Reinhard Breuer
Chefredakteur

Übergewicht ist gut fürs Geschäft, leider

Das Frühjahr geht, der Sommer kommt – und eines ist wie immer: Die Magazine überbieten sich mit neuen Diätanleitungen, urlaubswillige Menschen holen die Badesachen aus dem Schrank und blicken unwirsch bis angewidert auf ihren Winterspeck. Nichts Neues also unter der Sonne?

Doch, denn in letzter Zeit geben Forscher nun schon fast dramatische Appelle für Verhaltensänderungen aus. Sie machen nicht nur klar, warum Diäten und Abmagerungskuren so oft scheitern; sie weisen nach, dass in den westlichen Industrienationen die Zahl der Übergewichtigen rapide zunimmt. Wie das Fachblatt »Science« im Februar in einem Spezialreport berichtete, kommt »die jüngste Zunahme von Fettleibigkeit« einer globalen Epidemie gleich; in ihrer Schwere sei diese Pandemie mit dem Krebsproblem vergleichbar. Auch für die Weltgesundheitsorganisation WHO rangiert Übergewicht inzwischen unter den »Top Ten« der globalen Gesundheitsprobleme.

Korpulenz ist nicht nur eine Frage des Aussehens: Bluthochdruck, Diabetes und Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind typische Folgen von starkem Übergewicht. 16 Millionen Deutsche leiden daran, weltweit sind hunderte Millionen betroffen. Die Ursachen sind reichlich banal: Unsere moderne Welt verführt Menschen dazu, mehr zu essen und sich weniger zu bewegen. Unser Körper ist nun einmal weit besser darauf eingestellt, für Hungersnöte Vorräte zu speichern, als diese wieder loszuwerden. Dabei wäre dem Übergewicht leicht abzuhelfen: Täglich 15 Minuten mehr laufen, empfehlen Experten, und bei jeder Mahlzeit auf drei Bissen verzichten. Die biologischen Mechanismen, die unsere Nahrungsaufnahme steuern, sind jedoch extrem komplex und in vielen Details noch gar nicht verstanden: Wie bekommen wir Hunger? Wie oft essen wir? Wie reguliert der Körper Unter- oder Übergewicht?

GEMÄLDE VON PIETER BRUEGHEL D.Ä.: DAS SCHLARAFFENLAND

AKG BERLIN

Kein Vorbild: Völlerei im Schlaraffenland

Es wäre der Traum jeder Pharmafirma, endlich einen funktionierenden Appetitzügler auf den Markt zu bringen. Offenbar sind Forscher inzwischen auf dem Weg zu wirksamen Pillen gegen Übergewicht: Sie melden grundlegende Fortschritte – sowohl in der Analyse der molekularen Signale, die kurzfristig über unser Hungergefühl entscheiden, als auch bezüglich der biochemischen Reaktionen, die langfristig unseren Fetthaushalt regulieren.

Mindestens so stark wie die Biochemie unseres Körpers wirken die gesellschaftlichen Anreize. Überproduktion und Verbrauch von Lebensmitteln sind einfach ein zu gutes Geschäft für alle, die daran verdienen. Kaum ein größerer Industriezweig »würde davon profitieren«, schreibt die Ernährungswissenschaftlerin Marion Nestle von der New York University, »wenn die Menschen weniger äßen«. Ob der Staat erst Steuern auf Fast Food und Cola erlassen muss, bevor die Dicken im Lande lieber mehr Obst und Gemüse – und überhaupt weniger – zu sich nehmen?

Ein Missverständnis muss jedoch korrigiert werden: nämlich die These, dass wir nur deshalb zu Übergewicht neigen, weil unser moderner Speiseplan nicht mehr dem der Jäger und Sammler der Altsteinzeit entspricht. Unser Artikel auf S. 30 sagt Ihnen, warum Forscher dies inzwischen anders sehen.

Toplektüre für *Hobby-Astronomen*

Gerald North
■ **Den Mond beobachten**
Dieser reich illustrierte Band führt in die Techniken der Mondbeobachtung ein, und enthält zugleich von A bis Z die wichtigsten Details der Mondlandschaft. Zu den entscheidenden Vorzügen von North's Buch gehören die praktische Ausrichtung - d.h. viele Hinweise auf Stärken und Schwächen verschiedenster Teleskoptypen und -ausstattungen - sowie die Mischung von anschaulichen Photos und instruktiven Karten und Übersichten. Eine unerschöpfliche Fundquelle für alle Hobby- und Hinterhofastronomen!
2003, 360 S., 250 Abb., geb., € 39,95,
ISBN 3-8274-1328-1

Aktuelle Lesetipps !

Günter D. Roth
■ **Planeten beobachten**
Mit Zeichnungen, Fotos und hochauflösender CCD-Technik kann der Amateur kosmische Landschaften dokumentieren. Das nun in 5. Auflage von Günter D. Roth herausgegebene praxisnahe Mehrautorenbuch *Planeten beobachten* vermittelt unentbehrliche Tipps und Tricks für perfekte Weltraumerlebnisse.
5. Aufl. 2002, 350 S., 230 Abb., geb., € 29,95,
ISBN 3-8274-1337-0

Philip S. Harrington
■ **Sonnen- und Mondfinsternisse beobachten**
Wann und wo sind Sonnen- und Mondfinsternisse zu beobachten? Wie kann ich sie fotografieren? Auf welche Erscheinungen muss ich dabei besonders achten? Diese Fragen beantwortet Philip Harrington in seinem Buch ausführlich und für Einsteiger verständlich.
2002, 380 S., 150 Abb., geb., € 29,95,
ISBN 3-8274-1329-X

Bestellen können Sie per Tel. 07071/935369, per Fax 07071/935393 oder per Mail shop@spektrum-verlag.de
Preise enthalten 7% Mwst. und verstehen sich zzgl. Versandkosten (im Inland € 3,50 pro Lieferung).

Spektrum Akademischer Verlag

www.spektrum-verlag.de

FORSCHUNG AKTUELL

8 **Einzigartiger Einblick in die Urzeit des Universums**
Satellit Wmap liefert detaillierte Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung

12 **Interview zur Lungenerkrankung SARS**
Wie der Erreger des neuen akuten Atemwegsyndroms aufgespürt wurde

14 **Entscheidung unter Unsicherheit – die Ergebnisse**
Im Spektrum-Gewinnspiel erweist es sich als beste Strategie, unkooperativ zu sein

23 **Bild des Monats**
Lichtecho einer Sternexplosion

SPEKTROGRAMM

64 Bebende Dunkelwolke · Wundersame Terahertz-Strahlen · Älteste menschliche Fußspuren · Nur Autos im Kopf u. a.

THEMEN

24 **25 Jahre Spektrum der Wissenschaft Teil V: Mathematisches Denken**
Neue Methoden, vielfältige Anwendungen und die Lösung uralter Probleme

30 **Unsere Vorfahren: keine Vegetarier**
Die verkannten Voraussetzungen der Menschenevolution

56 **TITELTHEMA: Magnetare**
Gewaltige Beben auf Neutronensternen können über viele tausend Lichtjahre hinweg die Erde beeinflussen

66 **Stammzellen**
Wie sind die Aussichten auf eine Gewebereparatur mit diesen potenten Zellen?

74 **Optische Täuschungen**
Wie das Gehirn Bilder konstruiert

82 **Die Komplexität von Kaffee**
Ein Cocktail aus hunderten chemischer Stoffe ergibt den erlesenen Geschmack

90 **Nanospeicher**
»Tausendfüßler« lesen Gigabytes

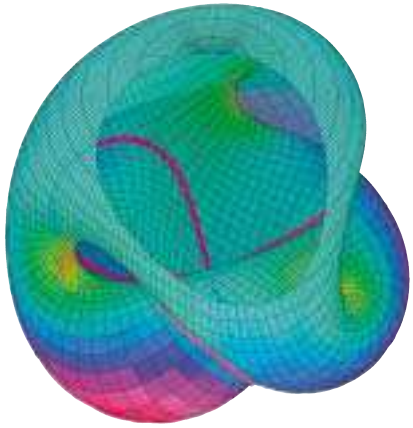
98 **Gehirn-Geziefer**
Parasiten beeinflussen Neuronen

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

104 **Risikomanagement im OP**
Wenn Narkoseärzte von der Luftfahrt lernen, nutzt das den Patienten

106 **Linux-Cluster macht Schule**
Wie aus alten PCs ein leistungsfähiges Netzwerk entsteht

Titelbild: Hohe Drücke, geladene Teilchen, ultrastarke Magnetfelder: Wenn die Oberfläche eines Neutronensterns reißt, werden Urgewalten des Kosmos frei. *Bild: Don Dixon*

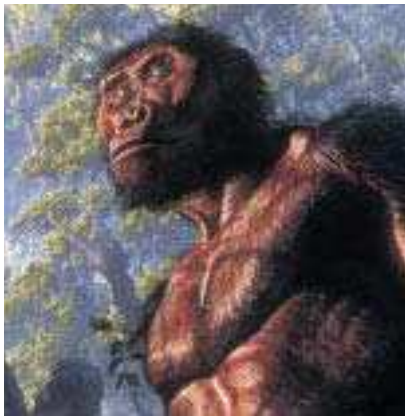


SEITE 24

SERIE »25 JAHRE SPEKTRUM« (V)

Ein Vierteljahrhundert Mathematik

Die »Königin der Wissenschaften« ist vielseitiger geworden. Das Arbeitsmittel Computer eröffnet völlig neue Perspektiven, und die Grenzen zwischen den Teildisziplinen verschwimmen.



SEITE 30

EVOLUTION

Menschwerdung durch Kraftnahrung

Lange behaupteten Ernährungsforscher, Zivilisationskrankheiten würden deshalb überhand nehmen, weil wir uns anders ernähren als die Jäger und Sammler der Altsteinzeit. Jetzt wird klar, dass die Lage komplexer ist.

SEITE 66

STAMMZELLEN

Potente Zellen

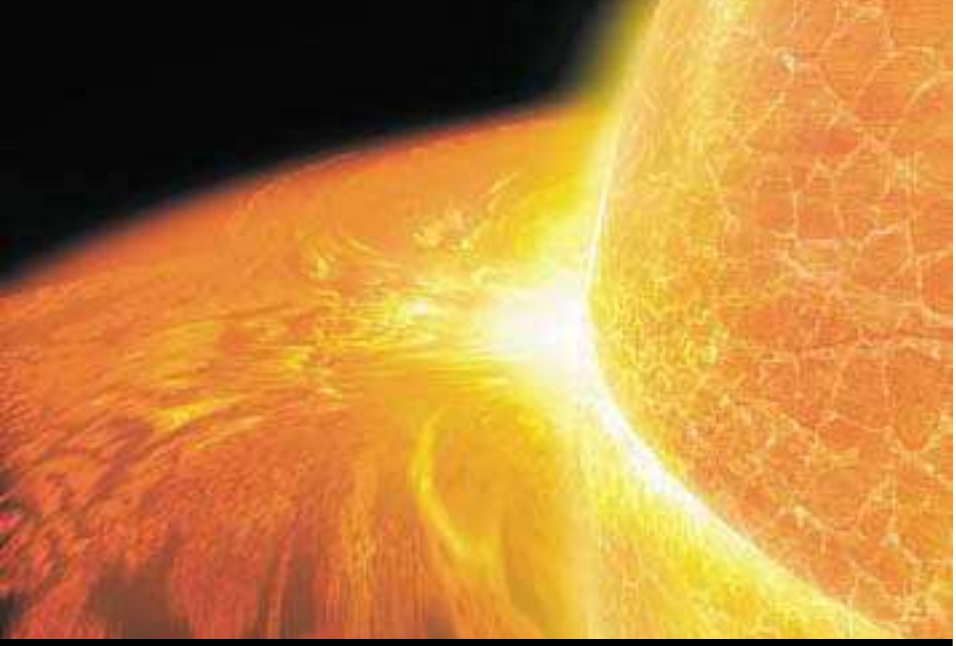
Die Forschung mit menschlichen embryonalen Stammzellen ist ethisch umstritten und Thema vieler Diskussionen – aber sie birgt auch ein großes Potenzial zur Heilung schwerer Krankheiten.

SEITE 74

WAHRNEHMUNG

Richtiges Sehen – eine optische Täuschung?

Das Auge unterliegt vielen optischen Trugschlüssen. In Konfliktsituationen interpretiert das Gehirn die Bilddaten offenbar nach ihrer Wahrscheinlichkeit – und irrt sich dann manchmal.



TITELTHEMA: ASTROPHYSIK

SEITE 56

Magnetare

Manche Neutronensterne haben derart starke Magnetfelder, dass sich auf ihnen höchst seltsame Ereignisse abspielen: Wie bei einem Erdbeben reißt ihre Oberfläche auf und setzt dabei gewaltige Energiemengen frei.

SEITE 82

KAFFEE

Von der Bohne zum Espresso

Für Kaffee höchster Qualität muss alles stimmen: von den Anbau- und Erntebedingungen über die Röstung und das Aufbrühen bis hin zur Wahl der Tasse. Nur dann entfalten sich die vielen hundert Aromastoffe, die den Geschmack eines Espresso ausmachen.

SEITE 90

DATENTECHNIK

Unterwegs zum Nanolaufwerk

Ein nanotechnisch fabrizierter »Tausendfüßler« soll auf einer briefmarkengroßen Chipkarte mehrere Gigabytes Daten schreiben – genügend Speicherplatz für einige Spielfilme oder ganze Bibliotheken. Doch bis zur Marktreife des Produkts sind noch knifflige Probleme zu lösen.

SEITE 98

ESSAY

Geziefer im Gehirn

Die Zeit ist reif für ein wenig Bescheidenheit. Denn so manche Mikrobe kann unsere neuronalen Schaltkreise besser beeinflussen als wir.

110 Defizite in der Wahrnehmung
Die Ursachen des Terrorismus müssen besser erforscht werden

KOMMENTARE

3 Editorial
Übergewicht ist gut fürs Geschäft

13 Am Rande
Verrückt durch Rudern im Weltraum

22 Glosse
Neue Optionen für ein Leben nach dem Tode

108 Nachgehakt
Das Geschäft mit dem Fisch

REZENSIONEN

119 ▷**Farben – Natur, Technik, Kunst** von Nobert Welsch und Claus Chr. Liebmann ▷**Arroganz der Macht, Arroganz der Ohnmacht** von Gert Krell ▷**Teil der Welt** von Heinz von Foerster und Monika Bröcker ▷**Imperial Ecology** von Peder Anker ▷**Am Anfang war die Doppelhelix** von Ernst Peter Fischer ▷**POEMA** von Manfred Linke und Rainer Osnowski

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

114 Käsekästchen für Fortgeschrittene

WISSENSCHAFT IM ...

55 Rückblick: Elektronenmikroskop; Heidelberger Armprothese u. a.

88 Alltag: Schreibgeräte

102 Unternehmen: Metallschwämme

129 Internet: Die Doppelhelix

WEITERE RUBRIKEN

6 Leserbriefe · 7 Impressum · 123 Preisrätsel · 131 Stellenmarkt · 134 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Die explosive Entstehung der Tierwelt

Die Evolution der Tiere begann früher als bisher gedacht. Schritt für Schritt kommt Licht in die Entfaltung der Tierwelt vor über 500 Millionen Jahren.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE
NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Editorial

April 2003

Weite Risikospanne

Impfungen sind zweifellos meist ein Segen, Impfverweigerer zu inkriminieren, wie in diesem Editorial, ist aber doch etwas zu schlicht: Impfschäden sind ja kein Hirngespinst, die Risikospanne klafft – je nach Impfung – von fast null bis hin zu letalen Schäden.

Spektrum wäre also besser beraten, redaktionellen Raum zu bieten für Aufklärung und sachliche, differenzierte Auseinandersetzung über Chancen und Risiken von Vorsorgeimpfungen!

Karsten Dörfer, Heinade

Sinkende Impfbereitschaft

Herr Breuer sollte mal ernsthaft hinterfragen, warum die Impfbereitschaft der Bevölkerung sinkt. Dafür verantwortlich sind möglicherweise Ärzte, die vor den Nebenwirkungen bei Impfungen warnen. Vielleicht informieren sich die Leute heutzutage einfach nur gut und folgen nicht mehr im blinden Vertrauen den Empfehlungen eines Arztes, der sich mit Impfungen sowieso nur am entferntesten Rande seines Medizinstudiums befassen musste.

Die Behauptung, dass die »Sicherheit heutiger Impfstoffe dank aufwendiger Untersuchungen auf Nebenwirkungen exzellent« sein soll, halten wir für gefährlich verharmlosend und zudem als eine Ohrfeige für alle Impfgeschädigten.

Als der hilfreichste Ratgeber bei der Impfentscheidung hat sich für uns das Heft Nr. 16 aus der Schriftenreihe von Natur und Medizin e. V. erwiesen. Ulrich Koch setzt sich dort kritisch mit dem Für und Wider von Impfungen auseinander. Herausgeberin ist Dr. med. Veronica Carstens.

Annette Lintz und
Thomas Ernst, Wiesbaden

Diktatur der Medizin

Für eine wissenschaftliche Zeitschrift ist es gut, wenn sie auch die Möglichkeiten und Folgen des technischen Fortschritts betrachtet und diskutiert. Dass Herr Breuer durch die Blume eine Diktatur der Medizin zum Wohle aller fordert, ist sicherlich ein guter Reizpunkt für eine derartige Diskussion. Ich kann es allerdings nicht nachvollziehen, dass die technische Möglichkeit, eine Erkältung zu verhindern, über das Grundrecht jedes Einzelnen auf Selbstbestimmung gestellt werden soll.

Für niveaulos halte ich die Aussage: »Dabei ist die Sicherheit von Impfstoffen ... exzellent ..., da Impfstoffe ja nur gesunden Menschen verabreicht werden.« Impfstoffe haben sicherlich überproportional vom Fortschritt der letzten Jahre profitiert, ihre Eigenschaften oder Qualität ändern sich allerdings nicht dadurch, dass sie auf gesunde Menschen oder solche ohne Krankheitssymptome(!) angewandt werden.

Dipl.-Ing. Rainer Lange, Hannover

Wie funktioniert der Gyrotwister?

Physikalische Unterhaltungen, Februar 2003

Nasa-Kreisel

Die LED-Leuchteffekte sollen »nur« den Spaßfaktor erhöhen. Die dafür benötigte Energie liefert ein kleiner Dynamo, dessen Magnet auf dem Führungsring der Kreiselachse sitzt.

Ganz neu sind diese Handkreisel (die allerersten heißen »Dyna Bee«) nicht, denn es gibt sie seit Mitte der 1990er. Die »Dyna Bee« hat die Nasa erfinden lassen, weil sie auch in der Schwerelosigkeit funktioniert.

Johann Stoehr, Kiel

JAGO-TEAM, SEEWIESEN

In 248 Meter Tiefe, auf dem Dach des Sula-Riffs, wachsen Tiefwasserkorallen.

Korallengärten

Februar 2003

Steinernes Archiv

Die Geowissenschaften verfügen über ein immenses steinernes Archiv ökologischer und klimatischer Daten, die meines Erachtens in der Klimaforschung noch nicht genügend berücksichtigt werden. Dort wird derzeit hauptsächlich mit Computermodellen im gegenwartsnahen Bereich gearbeitet. Die Ergebnisse jeder Modellrechnung können aber nur so gut sein, wie die Kenntnisse über die Anfangsvoraussetzungen. Diese liegen in den Stein gewordenen Archiven der Erde selbst. Die Modelle müsste man also an der Vergangenheit prüfen, bevor man sie für Voraussagen nutzt.

Die Karbonatgesteine sind als Deponie für den größten Anteil des die Biosphäre durchlaufenden Kohlendioxids zu betrachten. Dieses in der Atmosphäre und in der Hydrosphäre enthaltene Gas wurde und wird ihnen größtenteils durch biogene Prozesse und durch anorganische Ausfällung entzogen. Das Verhältnis des in Biomasse und fossilen Brennstoffen gespeicherten Kohlendioxids zu dem in Karbonatgesteinen gespeicherten wird derzeit auf circa 1 : 1,5 Millionen geschätzt! Die Geowissenschaften sollten mit ihrem Wissen über das Klimaverhalten während der vergangenen Jahrmillionen stärker Einfluss auf die Entwicklung von mehr oder weniger kurzfristigen Klimamodellen nehmen.

Jörg Dornemann, Mülheim

Heißer Dampf aus kalter Flamme

Wissenschaft im Unternehmen, Januar 2003

Lange Lebensdauer

Bei der Weiterentwicklung »Steam Cell« der Firma Enginion AG rasen keineswegs die Kolben, das Antriebsaggregat ist eine völlige Neuentwicklung, im Prinzip eine als Turbine geschaltete Drehschieberpumpe. Durch Beschränkung von Druck und Temperatur auf den unterkritischen Bereich und moderne Materialien werden Lebensdauern erreicht, die entsprechende Daten von Pkw-Motoren um das Zwanzigfache übertreffen. Diese Entwicklung hat das Potenzial, den gesamten Heizungs- und Energiemarkt zu revolutionieren, jedenfalls wenn Energiekonzerne und Heizkesselproduzenten mitmachen.

Prof. Walter A. Franke, Berlin

Wie kommt man nach Disentis?

Mathematische Unterhaltungen, Januar 2003

Interaktive Blätter

Im Rahmen meiner tutoriellen Tätigkeit habe ich auf Grundlage des Artikels mit Hilfe des Computeralgebra-Systems MuPAD (SciFace Software und Universität Paderborn) drei interaktive Arbeitsblätter zur »Reise nach Trisentis« für den Einsatz in Schule und Studium gestaltet. Teil 1 beschreibt die Grundlagen und motiviert mit einem interaktiven Spiel. Teil 2 realisiert die mathematische Lösungsfindung mit MuPAD. Teil 3 zeigt eine ästhetische Gestaltung des »Spiels« mit MuPAD.

Interessierte können diese interaktiven Arbeitsblätter kostenlos von www.mupad.de/schule +studium/lehrer, unter »Material« herunterladen.

Kai Gehrs, Paderborn

Der Ursprung lag in Afrika

Januar und März 2003

Verzweigter Stammbaum

Wir haben es bei diesem Thema immer noch mit mehr oder weniger gut belegten Theorien zu tun. Folgende Ansätze halte ich für logisch: Der Stammbaum der Menschheit weist Verzweigungen auf, die irgendwann einmal geendet haben, und damit sind nicht alle Hominiden-Fossilien in eine direkte Linie einreihbar. Warum auch soll es bei der Entwicklung der Hominiden anders zugegangen sein als bei allen anderen biologischen Entwicklungen, folgen sie doch demselben Prinzip.

Dass sich unsere menschlichen Vorfahren in einer Region entwickelt haben und nicht parallel auf verschiedenen Kontinenten, erscheint absolut plausibel. Hat schon irgendjemand einmal die Wahrscheinlichkeit für eine parallele Entwicklung auf vier Kontinenten berechnet, mit der Maßgabe, dass alle ziemlich zeitgleich abgelaufen sind und dass sich die Produkte dieser Entwicklung alle noch einmal kreuz und quer vermischt haben? Ich kann mir nicht vorstellen, dass sich hierfür auch nur annähernd ein akzeptabler Wahrscheinlichkeitswert finden lässt.

Dr. Franz Peter Schmitz, Lüneburg

GÜNTER BRÄUER

Schädel von spätem Neandertaler und frühem modernen Menschen

Errata

Tintenstrahldrucker – die Mikrodampfmaschinen

Wissenschaft im Alltag, März 2003

Richtig ist, Cyan, Magenta und Gelb sind Grundfarben der *subtraktiven* Farbmischung, die im Druck allgemein eingesetzt wird.

Springmeister im Zahlenreich

Mathematische Unterhaltungen, März 2003

In der Grafik auf Seite 111 sind die Achsen falsch beschriftet. An der Abszisse (»Lückengröße 2d«) muss es »100«, »200«, »300« und so weiter statt »10^1«, »10^2« heißen. An der Ordinate (»Anzahl der Lücken«) muss es dagegen »10^0«, »10^2« … statt »0«, »2«, … heißen.

Gehirnforschung

März 2003

Der körpereigene Botenstoff im Gehirn, den das Bild auf S. 26 zeigt, ist nicht Methionin, sondern Methionin-Enzephalin, ein Peptid aus fünf Aminosäuren (Tyr-Gly-Gly-Phe-Met). *Red.*

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stv. Hersteller)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-711, Fax (06221) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 43 03, Fax (02244) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0211) 908 33 57, Fax (0211) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Daniel Fischer, Dr. Werner Gans, Angelika Hildebrandt, Dr. Peter John, Dr. Frank Scholz, Claus-Peter Sesin, Dr. Klaus Volkert.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-600, Fax (06221) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser- und Bestellservice: Tel. (06221) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (06201) 60 61 50, Fax (06201) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0211) 887-23 79, Fax (0211) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 887-23 86, Fax (0211) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (030) 61 68 61 50, Fax (030) 615 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (040) 30 18 31 94, Fax (040) 33 90 90; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0211) 301 35-20 60, Fax (0211) 133 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (069) 24 24-45 34, Fax (069) 24 24-45 55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (07 11) 22 475-40, Fax (07 11) 22 475-49; München: Reinold Kassel, Bernd Swetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (089) 54 59 07-12, Fax (089) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.

Gesamtherstellung:
Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69038 Heidelberg.
Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder in eine von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Form oder Sprache übertragen oder übersetzt werden. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Wissenschaft Online, Rothacker, National Geographic Humanitas; und Helmholtz. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

Fliegende Anti-Malaria-Waffen

Forschung aktuell, April 2003

Wir haben derzeit zumindest sechs einheimische Anopheles-Arten, die allerding zum Teil nur durch DNA-Analysen zu unterscheiden sind.

Bei der Bekämpfung der Malaria ist DDT leider immer noch unverzichtbar (vgl. DDT_Malaria.pdf). Ohne dieses Mittel hätte sich das überschwemmte Mosambik nicht vor Malaria retten können.

Das Bild auf Seite 15 des oben genannten Artikels zeigt statt einer Anopheles-Mücke eine Blut saugende Aedes aegypti, die Dengue- und Gelbfieber sowie das West-Nil-Virus überträgt.

Dr. Roland Kuhn

((Bild von Anopheles - http://www.eritja.com - Rücksprache mit Alice))

In dem Artikel wird behauptet die Malaria übertragende Anopheles-Mücke käme in unseren Breiten nicht vor. Das ist keineswegs der Fall. Dass zurzeit keine »hausgemachten« Malariafälle auftreten, liegt einzig und allein daran, dass die einheimischen Anopheles-Bestände frei von Plasmodien sind.

Erst in den 30er Jahre des 20. Jahrhunderts sind die letzten Fälle von nicht eingeschleppter Malaria am Oberrhein aufgetreten.

Die mit der Rheinregulierung einhergehende Austrocknung vormaliger ausgedehnter Feuchtgebiete verschlechterte die Brutbedingungen und den Fortpflanzungserfolg von Anopheles. Weniger Mücken - weniger Übertragungswege für die Plasmodien, dieser Kreislauf führte zum langsamen Verschwinden der Plasmodieninfektion bei Anopheles (aber nicht von Anopheles selbst) und damit der Malaria in unseren Breiten.

Das muss aber nicht so bleiben. Durch geplante Maßnahmen im Rahmen des Integrierten Rheinprogramms mittels »Ökologischer Flutungen« in Poldern entlang des Oberrheins wieder feuchte Auwälder zu schaffen, können durchaus Verhältnisse entstehen, die die Ausbreitung der Anopheles begünstigen. Ein weiterer Anopheles fördernder Faktor liegt in der erwarteten globalen Erwärmung des Klimas (siehe Artikel von Paul R. Epstein »Krankheiten durch Treibhauseffekt« in Spektrum 12/2000, Seite 40 ff.) Falls die dann erwarteten größeren Bestände wieder durch eingeschleppte Erreger infiziert werden ist auch die Rückkehr der Malaria in unsere Breiten nicht auszuschließen.

Wilhelm Leppert, Schwanau

Warum gibt es Großmütter?

Januar 2003

Das überraschende Ergebnis, dass sich Großmütter väterlicherseits als eher schädlich herausstellen, ließe sich vielleicht wie folgt erklären: Womöglich stellen die Großmütter väterlicherseits die »Umverteilungsstelle« dar, an der Arbeit und Güter von der eher unsicheren Vaterschaftslinie auf die sichere Mutterschaftslinie geleitet werden. Jene Großmütter, die den (mutmaßlichen) Kindern ihrer Söhne schaden, dürften in den meisten Fällen auch noch Enkelkinder von eigenen Töchtern haben. Nutzen sie den Haushalt ihrer Söhne und insbesondere ihre Schwiegertöchter dazu, selber versorgt zu sein (mit Arbeitsleistungen und Gütern), können sie die so gewonnenen Ressourcen gut dazu nutzen, ihre (sicheren) Enkelkinder von ihren Töchtern zu unterstützen.

Andrea Albrecht, Köln

Editorial

Februar 2003

Im Editorial des Februarhefts heißt es zunächst, »Hochenergiephysiker haben es nicht leicht«, am Schluss haben wir jedoch ein »perfektes Gespann von LHC und Tesla«. Seiten später verfasst P. Ramond eine jener unsäglichen, teils absurden Darstellungen der Stringtheorie, und dann lässt uns Desy schließlich wissen, dass Hera voraussichtlich 2006 seine Aufgabe erfüllt haben wird. Hat Hera so wenig gekostet, dass man dort ganz cool bald »zumachen« darf? Stringtheorien gibt es so viele, wie ihre Ungereimtheiten (Tachyonen, wo sind die Fermionen?) zu Tage treten. P. Ramond gibt zu, dass sich ohne neue Beschleuniger »unsere Theorien immer mehr von der physikalischen Realität entfernen«. Müssen wir Milliarden Euro ausgeben, um einige tausend Teilchenphysiker ruhig zu stellen? Erzeugt diese Gruppe ihre Probleme nicht selbst? Das soziale Elend der Dritten Welt und das Energie- und Trinkwasserproblem werden wir mit Tesla und dem Beweis von Stringtheorien nicht beseitigen. Warum stellt Spektrum der Wissenschaft nicht dringendere Fragen? Mit Gott leben wir schon einige tausend Jahre, länger als man uns Sneutrinos aufdrängen will. Teilchenphysiker, seid bitte bescheidener und findet Alternativen.

Prof. Harald Reiss, Heidelberg

Die Klonbabays der Realianer

Kommentar, Februar 2003

Herr Groß vertritt hier einen bemerkenswert pragmatischen Standpunkt gegenüber den wissenschaftsethischen Problemen im Zusammenhang mit dem reproduktiven Klonen. Er stellt fest, dass die schleichende Anpassung der Moralvorstellung an das technisch Mögliche bisher immer denen Recht gegeben hat, die der Fortpflanzung so gut wie möglich nachhelfen wollen, womit angedeutet wird, dass das wohl auch beim Klonen der Fall sein wird. Bezüglich des therapeutisches Klonens stimme ich Herrn Groß zu: Sofern erfolgreich, dürfte das Embryonenschutzgesetz rasch sang- und klanglos kassiert werden.

Anders liegt die Sachlage beim reproduktiven Klonen. Hier wird doch eine der wichtigsten Erfindungen der Evolution des Lebendigen, die Sexualität, konterkariert. Durch die Vereinigung der väterlichen und mütterlichen Gene kommt eine ständig neue Durchmischung und Neukombination der Erbinformationen in Gang. So werden immer wieder Individuen in die Welt gesetzt, die auch bei Änderung der Umweltbedingungen eine Überlebenschance haben. Reproduktives Klonen dagegen führt zur Konstanz der Erbanlagen. Sollte so etwas in größerem Umfang möglich werden, sind die Folgen problematisch; denn zum einen gibt es keinen optimal angepassten Typ, zum andern kann niemand die künftigen Änderungen der Umweltbedingungen voraussagen.

Darf man etwas versuchen, das man auf Grund unseres Wissens als verhängnisvoll erkennen kann?

Dr. W. Jerg Hönes , Upfingen

Editorial+++++++

April 2003

Heißer Dampf aus kalter Flamme ++++

Wissenschaft im Unternehmen, Januar 2003

Ehrlich sein bei Namensgebung

So lobenswert hochgradig energieeffiziente Kraft-Wärme-Maschinen mit kompakten Baumaßen und geringem Schadstoffausstoß auch sein mögen: Es handelt sich bei der beschriebenen »Zero Emission Engine« um eine Verbrennungsmaschine, die fossile Energieträger nutzt. In Anbetracht des zunehmenden Treibhauseffekts und der damit verbundenen globalen Klimaveränderung darf Kohlenstoffdioxid als Schadstoff nicht länger vernachlässigt werden. Somit spiegelt die Bezeichnung »Zero Emission Engine« falsche Tatsachen vor. Selbst im Fall einer optimalen (also stöchiometrischen) Verbrennung von Erdgas entstehen aus 1 kg Methan 2,25 kg CO_2. Hierbei gleich von Null-Emission zu sprechen halte ich für reichlich übertrieben. Selbst beim Einsatz von Rapsöl als »nachwachsendem« Energieträger wird in einer Gesamtbilanz noch CO_2 freigesetzt. Denn auch wenn Raps während des Wachstums etwa so viel CO_2 aufnimmt, wie bei der Verbrennung von Rapsöl entsteht, dürfen Emissionen während des Produktionsprozesses und des Transports von Rapsöl nicht übersehen werden.

Ich begrüße zwar die Entwicklung derartig optimierter Maschinen, aber bei der Namensgebung sollte man auch ehrlich sein. Daher ist die Bezeichnung »SteamCell« der Weiterentwicklung wohl die bessere Wahl als »Zero Emission Engine«.

Christoph Schaefer, Berlin

Als die Gallier Römer wurden

Februar 2003

Ich habe den Artikel mit Interesse und Vergnügen gelesen, meine aber, dass die Sicht des Autors, dass zivilisatorische/kulturelle Entwicklung von südlich der Alpen kam, zu sehr der etablierten Sicht des graeco-romanischen Humanismus folgt.

Als beim Niedergang der Hethiterreiches Hattusa »besenrein«, also nicht durch Feindeinwirkung verlassen wurde, muss dies durch zwei Wanderströme erfolgt sein. Die Vornehmen zogen sich in ihre Besitzungen südlich des Taurusgebirges zurück, die »Eisen schaffende Bevölkerung«, die dort keine geeignete Rohstoffbasis fand, wanderte ins Donaugebiet aus und ihr kultureller Einfluss lässt sich entlang Donau und Rhein bis nach England verfolgen. Ein Zweig dieser Eisenwanderung führt über Noricum nach Italien.

In diesem Falle kam die »Etruskische Kultur« nicht wie angenommen von Süden über die Alpen nach Norden, sondern die Etrusker brachten umgekehrt die Eisenkultur über die Alpen nach Süden mit.

Die Kulturvölker nördlich der Alpen litten an zwei Schwächen, die zu Ihrer Auslöschung durch die Römer führten. 1. die Zersplitterung in Kleinstaaten, die sich ständig bekämpften, und 2. das Fehlen einer Schrift. Die komplexen Schriften der Hethiter blieben bei der Wanderung auf der Strecke.

Mangels schriftlicher Überlieferung kann man diesen Zug der Hethiter, wie Johannes Lehmann anhand »auf Stieren stehender« Götterbilder nachzuweisen versuchen, oder aber anhand noch versprengt erhaltener hethitische Worte. Der Wortstamm Tusa könnte so etwas Ähnliches Eisenhütte bedeutet haben und die Tusa-Leute wären dann die Eisen Schaffenden.

Christian Schiel, Murnau

Fliegende Anti-Malaria-Waffen

Forschung aktuell, April 2003

Wir haben derzeit zumindest sechs einheimische Anopheles-Arten, die allerding zum Teil nur durch DNA-Analysen zu unterscheiden sind.

Bei der Bekämpfung der Malaria ist DDT leider immer noch unverzichtbar (vgl. DDT_Malaria.pdf). Ohne dieses Mittel hätte sich das überschwemmte Mosambik nicht vor Malaria retten können.

Das Bild auf Seite 15 des oben genannten Artikels zeigt statt einer Anopheles-Mücke eine Blut saugende Aedes aegypti, die Dengue- und Gelbfieber sowie das West-Nil-Virus überträgt.

Dr. Roland Kuhn

Das neue Einmaleins von Wasserstoff und Sauerstoff

Forschung aktuell, März 2003

So neu ist dieses Einmaleins nun auch wieder nicht, zumindest was das Wasserstofftrioxid (H_2O_3) angeht. Schon 1993 haben zwei Chemiker an der Universität Ljubljana das Molekül bei –78 °C gewinnen können und gefunden, dass es auch bei Zimmertemperatur noch nicht völlig zerfallen ist. Sie bedienten sich eines Weges, der sonst für die großtechnische Herstellung von Wasserstoffperoxid genutzt wird. Während nämlich die direkte Hydrierung von Sauerstoff zu Wasserstoffperoxid (O_2+H_2——> H_2O_2) nicht praktikabel ist, gelingt sie mit 2-Ethylanthrahydrochinon. In gleicher Weise kann Ozon (O_3) zum Wasserstofftrioxid hydriert werden. Das in beiden Fällen entstehende 2-Ethylanthrachinon lässt sich mit Wasserstoff und Nickel oder Palladium als Katalysator in das Hydrochinon zurückführen, sodass in summa die einfachen Hydrierungen von O_2 und O_3 verwirklicht werden.

Prof. Dr. Alfred Schmidpeter, München

KOSMOLOGIE

Einzigartiger Einblick in die Urzeit des Universums

Der Satellit Wmap hat die bisher detailreichste Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung geliefert. Sie erlaubt präzise Rückschlüsse auf Alter und Zusammensetzung des Universums sowie Einblicke in die Zeit vom Urknall bis zur Entstehung der ersten Sterne.

Von Georg Wolschin

Euphorisch sprechen manche von einem Wendepunkt in der Kosmologie. Tatsächlich gab es noch nie so präzise Aussagen über die Anfänge des Alls wie in den 13 umfangreichen wissenschaftlichen Artikeln, die US-Forscher nun bei der Fachzeitschrift »Astrophysical Journal« zur Veröffentlichung eingereicht haben. Die neuen Erkenntnisse beruhen auf der Analyse von Daten des Satelliten Wmap *(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)*. Benannt nach dem kürzlich verstorbenen Kosmologie-Pionier David T. Wilkinson von der Princeton-Universität, hat er in seinem ersten zwölfmonatigen Beobachtungszyklus den Himmel in fünf Frequenzbändern von 23 bis 94 Gigahertz (bei Wellenlängen zwischen 13 und 3 Millimetern) vollständig erfasst.

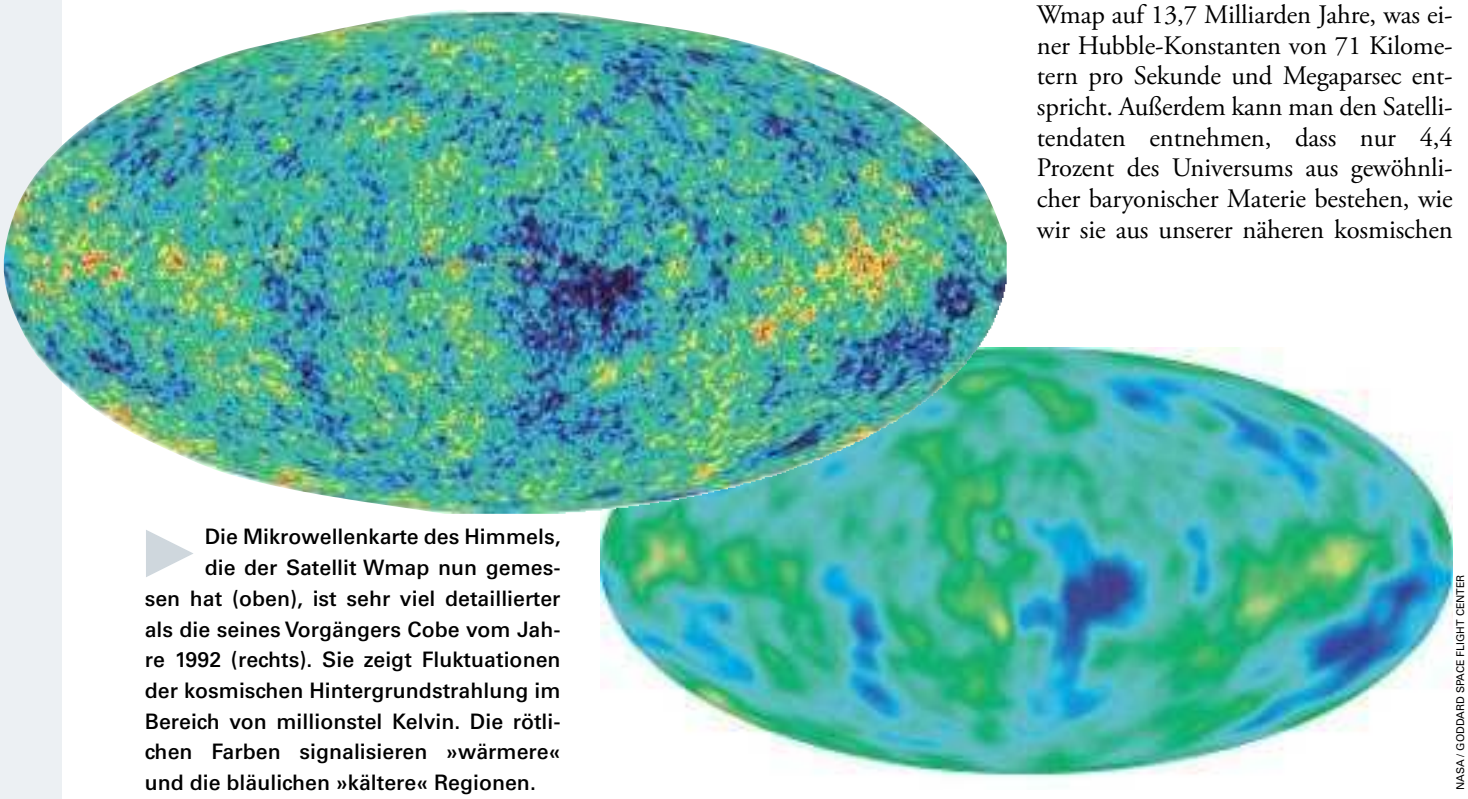
Nach dem Start im Juni 2001 bezog die Sonde eine Position in etwa 1,5 Millionen Kilometer Entfernung – an einer Stelle außerhalb der Erdbahn, an der sich die Gravitationskräfte von Erde und Sonne gerade ausgleichen. Dort misst sie die winzigen Schwankungen (Anisotropien) der kosmischen Hintergrundstrahlung, die als Keime der materiellen Strukturen im Universum gelten.

Diese Strahlung im Mikrowellenbereich hatten Arno Penzias und Robert Wilson 1964 bei einer Wellenlänge von 7,35 Zentimetern zufällig entdeckt. Die beiden Forscher erkannten sie als Relikt aus einer Zeit kurz nach dem Urknall, als typische Entfernungen im Universum noch etwa tausendmal kleiner als heute waren und die Temperatur 2980 Kelvin betrug. Damals leuchtete das frühe Weltall plötzlich auf, weil es durch die Vereinigung von Elektronen und Kernen zu neutralen Atomen strahlungsdurchlässig wurde und in die „materiedominierte Ära« überging, die bis heute andauert. Die Wellenlängen dieses Leuchtens haben sich wegen der Raumexpansion seitdem beständig um das Tausendfache in den Mikrowellenbereich hinein vergrößert.

Das Spektrum der Hintergrundstrahlung stimmt gut mit demjenigen überein, das ein so genannter Schwarzer Körper bei einer Temperatur von nur 2,73 Kelvin aussendet. Der Satellit Cobe *(Cosmic Background Explorer)*, den Wilkinson ebenfalls mit initiierte, hat dieses Spektrum im Jahre 1992 erstmals sehr genau gemessen. Außerdem aber durchmusterte er den gesamten Himmel und stellte dabei leichte Variationen in der Temperatur der Strahlung fest (Spektrum der Wissenschaft 3/1990, S. 78, und 6/1992, S. 18). Die neuen Messungen von Wmap sind im Prinzip ähnlich, aber über 35-mal detaillierter als die Cobe-Resultate (Bild unten links). Diese drastische Verbesserung erlaubte die nun vorgelegten äußerst präzisen Schlussfolgerungen.

Exakte Werte für die kosmologischen Parameter

So lässt sich der Zeitpunkt, zu dem das Weltall lichtdurchlässig wurde, jetzt auf 379 000 Jahre nach dem Urknall datieren. Das Weltalter beläuft sich laut Wmap auf 13,7 Milliarden Jahre, was einer Hubble-Konstanten von 71 Kilometern pro Sekunde und Megaparsec entspricht. Außerdem kann man den Satellitendaten entnehmen, dass nur 4,4 Prozent des Universums aus gewöhnlicher baryonischer Materie bestehen, wie wir sie aus unserer näheren kosmischen



NASA / GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

Die Mikrowellenkarte des Himmels, die der Satellit Wmap nun gemessen hat (oben), ist sehr viel detaillierter als die seines Vorgängers Cobe vom Jahre 1992 (rechts). Sie zeigt Fluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung im Bereich von millionstel Kelvin. Die rötlichen Farben signalisieren »wärmere« und die bläulichen »kältere« Regionen.

Umgebung kennen. Alles andere ist Dunkle Materie (22 Prozent) und Dunkle Energie (73 Prozent).

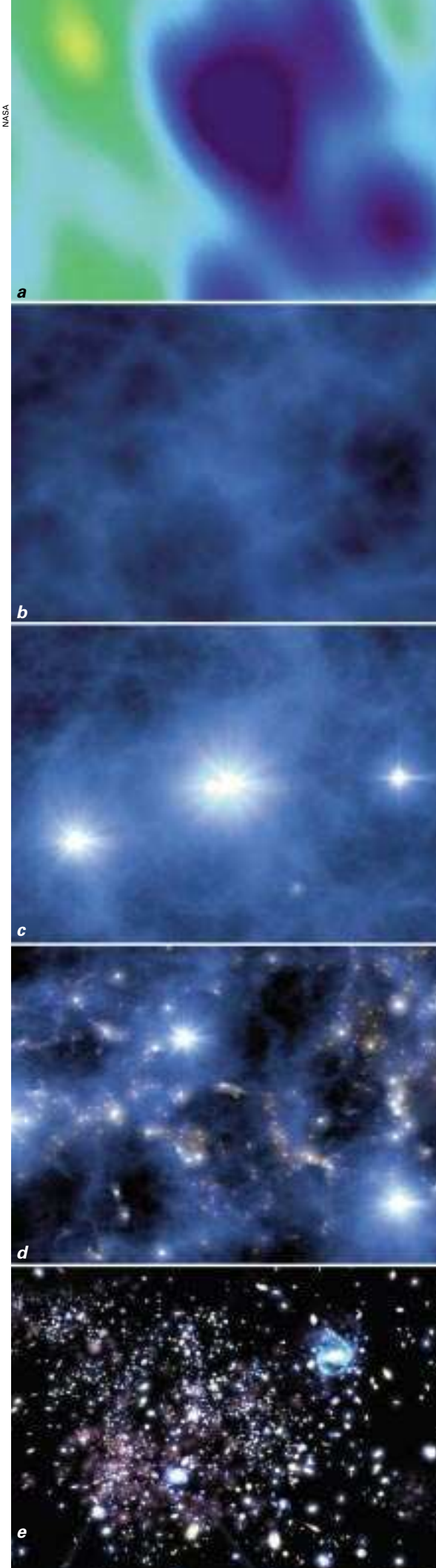
Diese Prozentangaben stimmen recht gut mit denen überein, die sich aus älteren Daten der Ballonmessungen Maxima und Boomerang ergeben haben (Spektrum der Wissenschaft 8/2000, S. 13). Allerdings erfassten die beiden früheren Sondierungen nur einen sehr kleinen Bereich des Himmels (bei Boomerang drei, bei Maxima 0,3 Prozent) und erreichten nicht die Genauigkeit von Wmap.

Wie lässt sich diese Fülle an präzisen kosmologischen Informationen aus hochaufgelösten Bildern des Himmels im Mikrowellenlicht ableiten? Zunächst sind verschiedene Korrekturen an den Rohdaten vorzunehmen. So bilden Emissionen aus der galaktischen Scheibe einen diffusen »Vordergrund«, der vom eigentlichen kosmischen Signal abgezogen werden muss. Ferner erzeugen helle extragalaktische Punktquellen störende Emissionen bei niedrigen Frequenzen; deshalb wurden 700 solche Objekte durch Masken ausgeblendet. Schließlich gilt es jene Verzerrung herauszurechnen, die von der Bewegung der Erde durch den Mikrowellenhintergrund herrührt.

Die derart bereinigten Daten werden dann nach »Multipolen« aufgetragen. Dabei schlüsselt man die Temperaturschwankungen der Hintergrundstrahlung danach auf, wie häufig sie auf unterschiedlichen Entfernungsskalen (gemessen in Winkelgraden) auftreten – analog zerlegt beispielsweise auch das Ohr Schallschwingungen nach Frequenzen und ermittelt dabei die enthaltenen Töne. Das Ergebnis dieser mathematischen Umformung ist ein Spektrum der Temperaturfluktuationen mit vielsagenden Maxima, deren Höhe und Position Aussagen über die kosmologischen Parameter ermöglicht. Der ausgeprägteste Höcker liegt bei einem Winkelbereich von etwa 0,9 Grad (Multipol 220). Er war dem Cobe-Satelliten noch nicht zugänglich, ist aber von den Ballonmessungen und anderen Beobachtungen her schon bekannt – wenn auch weit weniger genau. Das zweite Maximum bei kleineren Winkelskalen von etwa 0,3 Grad (Multipol 540) ließ sich nun erstmals klar nachweisen; ein theoretisch vorhergesagtes drittes Maximum bleibt dagegen verschwommen.

Das Spektrum spiegelt Dichteschwingungen im Universum jener Zeit wider, als Kerne und Elektronen noch getrennt vorlagen und ein Plasma bildeten. Dieses wurde von der Gravitation komprimiert, bis der Lichtdruck der Photonen die Bewegung umkehrte. So entstanden – ähnlich wie bei Luft im Telefonhörer – akustische Schwingungen. Dem ersten Maximum bei 0,9 Grad entspricht eine bestimmte »akustische Ausdehnung«. Daraus lässt sich das Alter des Universums und seine Geometrie bestimmen.

Das Universum entwickelt Strukturen in mehreren Schritten. Auf Grund räumlicher Temperaturschwankungen, wie sie Wmap gemessen hat *(a)*, kondensierte Materie unter dem Einfluss der Gravitation *(b)*. Durch Zündung von Kernfusionsprozessen entstanden etwa 180 Millionen Jahre nach dem Urknall die ersten Sterne *(c)*. Weitere kamen hinzu *(d)*, und längs der in *(b)* gezeigten Filamente bildeten sich die Galaxien und Galaxienhaufen des jetzigen Universums *(e)*.



Expansion ohne Ende

Die gemessene Position dieses Maximums passt zu den Voraussagen für ein flaches Universum. In ihm entspricht die Summe aus Massen- und Energiedichte genau dem kritischen Wert, bei dem die Expansion des Alls gerade nicht mehr aufhört. Das Verhältnis der Amplituden zwischen erstem und zweitem Maximum gibt dagegen die Massendichte zum Zeitpunkt der Vereinigung von Protonen und Elektronen zu Wasserstoff-Atomen an. Das Resultat stimmt mit experimentellen Daten zu den Häufigkeiten der leichten Elemente im Universum überein.

Die Gestalt des Spektrums zeigt ferner, dass die akustischen Oszillationen schon sehr früh Wellenlängen in kosmischen Dimensionen hatten – was nach heutigem Kenntnisstand nur verständlich ist, wenn sich das All Sekundenbruchteile nach dem Urknall für kurze Zeit exponentiell aufblähte. Durch diese »Inflation« erreichten winzige Quantenfluktuationen rasch kosmische Abmessungen, während die Materie- und Energiedichte insgesamt jedoch geglättet wurde, sodass das Universum im wesentlichen homogen und in allen Richtungen gleichförmig erscheint. Die Wmap-Daten liefern sogar einen weiteren Beleg für die Richtigkeit des Inflationsmodells: Sie zeigen eine gegenläufige Korrelation zwischen Temperaturfluktuationen und Polarisation der Mikrowellenstrahlung in ▷

▷ Winkelbereichen von ein bis zwei Grad, wie man sie in diesem Modell erwartet.

Während Einstein noch glaubte, in einem expandierenden Universum auf eine kosmologische Konstante in den Gleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie verzichten zu können, lassen sich die jetzigen Daten nur mit einem solchen so genannten Lambda-Term (Λ) beschreiben. Die ihm entsprechende »Dunkle Energie« muss sogar den weitaus größten Teil des Kosmos ausmachen, nämlich die schon erwähnten 73 Prozent.

Ihre physikalische Natur wird seit langem diskutiert. Walther Nernst lieferte schon 1916 eine Interpretation auf der Basis der Nullpunktsenergie des elektromagnetischen Feldes, die sich auch im kosmologischen Rahmen gravitativ auswirken sollte. Seit 1988 wird zudem die Möglichkeit eines zeitabhängigen Λ-Terms untersucht: Dieser hätte anfangs einen sehr hohen Wert, würde sich im Verlauf der Expansion des Alls verkleinern und schließlich verschwinden – ein auch als Quintessenz bezeichnetes Konzept (Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 32). Anhand des vorliegenden Spektrums der Temperaturschwankungen im Mikrowellenhintergrund lässt sich zwischen den beiden Möglichkeiten allerdings noch keine Unterscheidung treffen.

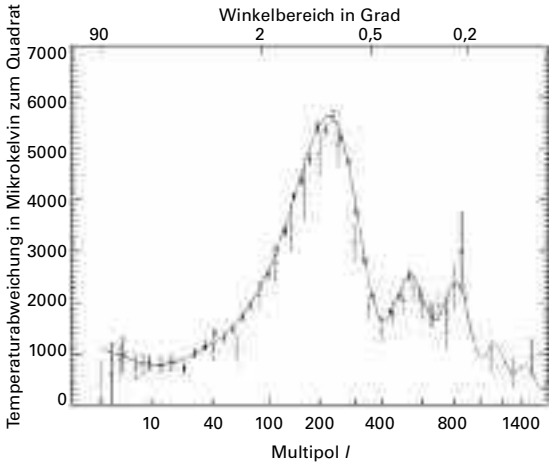
Warten auf Planck

Bei konstantem Λ ergibt sich die beste Anpassung zwischen den Wmap-Daten und dem derzeitigen kosmologischen Modell, wenn der Anteil des Universums an nichtbaryonischer kalter Dunkler Materie 22 Prozent beträgt. Die physikalische Natur dieses unsichtbaren Stoffes, der offenbar die Massen der Galaxien im heutigen Universum dominiert, bleibt dabei unklar. Dennoch ist das Ergebnis glaubwürdig, da insbesondere unabhängige Untersuchungen der Rotation von Galaxien vergleichbare Werte für den Anteil an Dunkler Materie ergeben.

Nachdem sich 379 000 Jahre nach dem Urknall neutrale Atome gebildet hatten, entstanden erstmals wieder geladene Teilchen, als die ersten Sterne aufflammten: Die von diesen ausgesandte hochenergetische (ultraviolette) Strahlung ionisierte den umgebenden Wasserstoff, und bei der Streuung an den so entstandenen freien Elektronen wurde das Licht polarisiert. Dadurch erlaubt die Polarisation der Hintergrundstrahlung in Verbindung mit den Temperaturanisotropien Rückschlüsse darauf, wann die Bildung von Wasserstoff-Ionen stattfand. Den entsprechenden Wmap-Daten zufolge geschah das 180 Millionen Jahre nach dem Urknall – etwa 500 Millionen Jahre früher als bisher gedacht. Allerdings ist die Fehlerschranke dieses Wertes mit +220/–80 Millionen Jahren noch sehr groß.

In den nächsten drei Jahren wird sich die Genauigkeit der Wmap-Daten weiter verbessern. Fundamental neue Resultate sind davon aber nicht zu erwarten. Stattdessen dürfte es eine Fülle von theoretischen Arbeiten geben, die auf den Messwerten aufbauen und weitere kosmologische Schlüsse ziehen.

Wesentliche Fortschritte verspricht erst der Satellit Planck der Europäischen Weltraumorganisation Esa, dessen Start für 2007 geplant ist. Er wird eine dreimal so hohe Auflösung erreichen wie Wmap und die Vordergrundstrahlung nochmals deutlich besser ausblenden. Damit sollte es insbesondere gelingen, Lage und Höhe des dritten Maximums im Spektrum präzise zu ermitteln, sodass sich alternative kosmologische Modelle leichter unterscheiden lassen. Bis dahin werden kleine Ausschnitte des Mikrowellenhimmels durch bodengebundene Experimente und Ballonmessungen mit noch höherer Genauigkeit untersucht. Wenn dabei die Polarisation der Strahlung mit erfasst wird, sollten sich vor allem weitere Aufschlüsse über die Entstehung der ersten Sterne ergeben. ◁



Die Wmap-Daten lieferten ein Spektrum der Temperaturfluktuationen als Funktion von »Multipolen« *l* (schwarze Punkte; ältere Daten sind rot eingezeichnet). Das erste Maximum bei *l* = 220 spiegelt Dichteschwingungen (»Schallwellen«) im frühen Universum wider. Das zweite Maximum bei *l* = 540 konnte erstmals von Wmap präzise ermittelt werden. Die kosmologischen Parameter ergeben sich durch Vergleich des gemessenen Spektrums mit Modellrechnungen; die durchgezogene Linie zeigt das Ergebnis einer solchen Rechnung, die optimal an die Wmap-Daten angepasst wurde.

GLOSSAR

- **Hubble-Konstante:** Parameter, der die Expansion des Universums mathematisch beschreibt.
- **Inflationsphase:** Sehr rasche Expansion des Universums Sekundenbruchteile nach dem Urknall.
- **Flaches Universum:** Der Raum hat eine euklidische Geometrie; die Summe aus Massen- und Energiedichte ist gerade so groß, dass die Expansion des Alls nicht mehr aufhört. Bei einer höheren Dichte wäre die Geometrie konvex, bei einer niedrigeren konkav. Die zweidimensionalen Analogien zum flachen, konvexen und konkaven Raum sind die Ebene, die Kugeloberfläche und die Sattelfläche.
- **Baryonische Materie:** Jene »gewöhnliche« Materie, die im All durch elektromagnetische Strahlung nachweisbar ist.
- **Dunkle Materie:** Materie im Kosmos, die zwar nicht anhand elektromagnetischer Strahlung nachweisbar ist, für die es aber deutliche indirekte Anzeichen gibt. Ihre Natur ist noch ungeklärt. Wahrscheinlich besteht sie aus mehreren unterscheidbaren Anteilen.
- **Dunkle Energie:** Entspricht dem kosmologischen Glied Lambda (Λ) in den Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins oder einer analogen zeitabhängigen Größe. Sie bewirkt, dass sich die Expansion des Universums beschleunigt.

Georg Wolschin ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.

G.HINSHAW ET AL., ASTRO-PH/0302217, EINGEREICHT BEI »ASTROPHYSICAL JOURNAL«

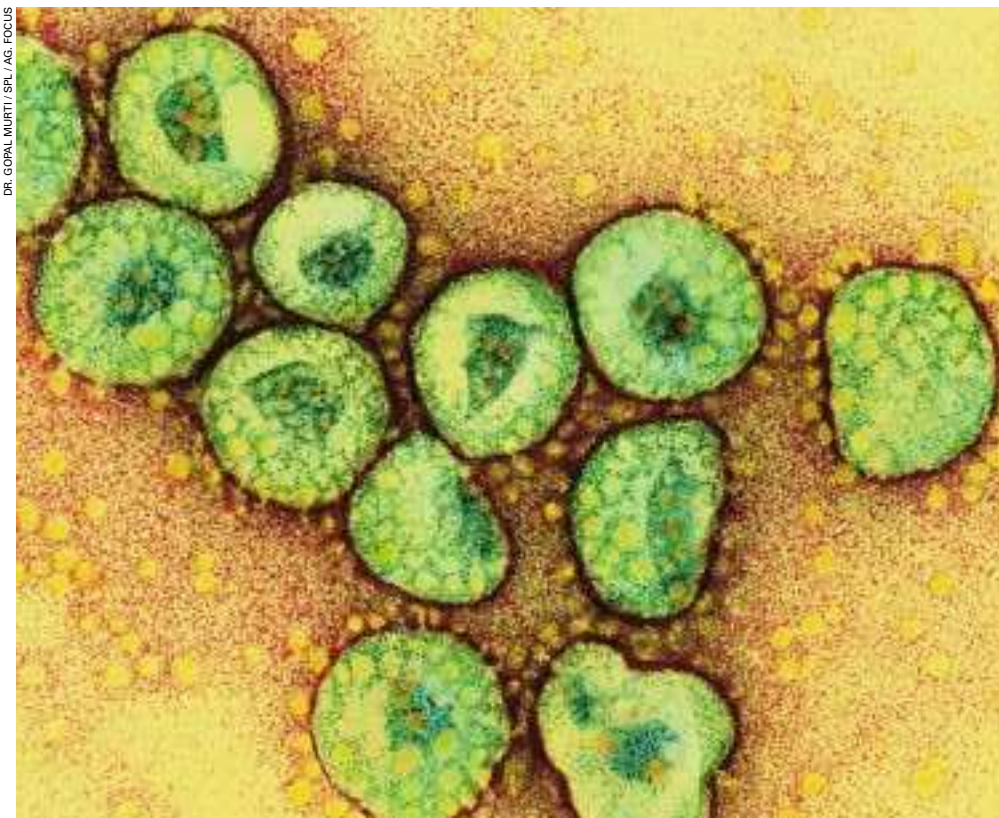
INTERVIEW ZUR LUNGENERKRANKUNG SARS

»Jetzt können wir anfangen antivirale Substanzen zu testen«

Christian Drosten, Virologe am Hamburger Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin, äußert sich zur Entdeckung des mutmaßlichen SARS-Erregers, an der er maßgeblich beteiligt war.

Seit Februar mehren sich die Fälle des »schweren akuten respiratorischen Syndroms« (SARS). Die gefährliche Lungeninfektion, die bis Anfang April schon fast hundert Todesopfer gefordert hat, breitet sich, begünstigt durch den Luftverkehr, von ihrem Ursprungsort in Südchina rasch weltweit aus.

Spektrum: Herr Drosten, am 25. März gab das Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin in Hamburg bekannt, den mutmaßlichen SARS-Erreger identifiziert zu haben.
Christian Drosten: Ja, nach unseren Ergebnissen handelt es sich um ein neues Coronavirus.
Spektrum: Was heißt das genau?
Drosten: Man kennt bisher schon verschiedene Vertreter aus dieser Virusfamilie, die den Menschen infizieren. Sie verursachen aber eher harmlose Erkältungskrankheiten und seltener auch Durchfall. Außerdem gibt es einige Coronaviren, die nur Tiere befallen. In einer genetischen Verwandtschaftsanalyse haben wir am Bernhard-Nocht-Institut gesehen, dass unser Virus näher bei einigen der tierpathogenen Erreger einzuordnen ist als bei den bekannten menschlichen. Insgesamt unterscheidet es sich allerdings so deutlich von den bekannten Coronaviren, dass es einer neuen Art angehören muss.
Spektrum: Wie hat man sich die Entstehung eines neuen Virus vorzustellen?
Drosten: Es gibt verschiedene Möglichkeiten. Einige Experten vermuten, dass das neue Coronavirus aus dem Tierreich auf den Menschen übergesprungen ist. Coronaviren sind RNA-Viren. Ihr Genom besteht also nicht aus DNA wie beim Menschen und allen höheren Lebewesen. Das bedeutet, dass die Vervielfältigung ihres Erbguts viel einfacher abläuft. Insbesondere gibt es weniger Korrekturmechanismen für eventuelle Kopierfehler. Die Wahrscheinlichkeit, dass in einem solchen Virus dann eine Mutation stattfindet, ist also relativ hoch. Wenn nun eine solche Mutation beispielsweise ein Protein betrifft, das für das Andocken auf der Tierzelle zuständig ist, kann es passieren, dass das Virus plötzlich auch menschliche Zellen infiziert. Und je nachdem, wie es dann mit der Zelle oder mit dem Immunsystem interagiert, kommt es möglicherweise zu völlig neuen Krankheitsbildern.
Spektrum: Wie haben Sie festgestellt, dass es sich bei dem SARS-Erreger um ein Coronavirus handeln muss?
Drosten: Zuerst einmal ist zu sagen, dass wir nicht als einzige, sondern zeitgleich mit den Centers for Disease Control in Atlanta zu diesem Ergebnis gekommen sind. Bei unserer Untersuchung sind wir von einer Zellkultur ausgegangen, die in der Virologie der Universität Frankfurt mit einer Probe von einem SARS-Patienten infiziert worden war. Das Nährmedium dieser Zellen, in das ja die Viren freigesetzt werden, wurde uns dann nach Hamburg geschickt – natürlich in inaktivierter Form. Daraus haben wir mit einem gängigen Verfahren – allerdings in einer Variante, die speziell zum Aufspüren von Viren geeignet ist – Abschnitte viraler Erbsubstanz vervielfältigt. Dabei arbeiteten wir zunächst mit einer Zufallsmethode, die auf verschiedenste Viren abzielt. Wir hatten ja noch keinen speziellen Verdacht.
Spektrum: Und an diesen Genabschnitten konnten Sie erkennen, welches der Erreger von SARS ist?
Drosten: Ja, wir erhielten ein Stück Virusgenom, das wir in das entsprechende Proteinstück übersetzten. Die Abfolge der Proteinbausteine verglichen wir dann mit Sequenzen aus Datenbanken. So sahen wir, dass der Erreger verschiedensten Tier-Coronaviren stark ähnelt. Parallel zu unseren molekularbiologischen Untersuchungen lieferten unsere Frankfurter Kollegen den nötigen ergänzenden Beweis für unsere Ergebnisse: Sie stellten fest, dass der Patient Antikörper gegen das Virus in unserer Probe entwickelt hatte.
Spektrum: Wie sicher kann man denn nun sein, dass das von Ihnen identifizier-



DR. GOPAL MURTI / SPL / AG. FOCUS

Coronaviren verursachen vermutlich die schwere Lungenerkrankung SARS. Der Name der Erreger rührt von einem Kranz aus vorstehenden Oberflächenproteinen her, der auf dieser elektronenmikroskopischen Aufnahme deutlich zu erkennen ist.

te Virus tatsächlich der gesuchte SARS-Erreger ist?

Drosten: Die epidemiologischen Untersuchungen fangen ja gerade erst an. Man kann auf Grund der aktuellen Daten, die wir Stückchen für Stückchen bekommen, nur sagen, dass sich unser Verdacht immer mehr erhärtet. Wir haben mittlerweile unsere Methode verfeinert und konnten außerdem unser Material – in Kooperation mit einer Biotechnologiefirma – für Untersuchungen weltweit verschicken. Dadurch wurde bereits in vielen Labors auf der Welt das neue Coronavirus in den Proben von SARS-Patienten nachgewiesen. Zudem zeigen ganz neue Daten aus Südostasien, dass im Blut vieler Patienten ganz klar Antikörper gegen das Coronavirus zu finden sind.

Spektrum: Standen ursprünglich nicht ganz andere Viren unter Verdacht, so genannte Paramyxoviren?

Drosten: Wir in Hamburg haben niemals Paramyxoviren gesehen. Die Kollegen in Frankfurt und Marburg entdeckten im Elektronenmikroskop Viren, bei denen es sich dem äußeren Erscheinungsbild nach unter anderem um Paramyxoviren handeln konnte. Durch molekularbiologische Tests in Frankfurt, Marburg und Rotterdam ließ sich die Anwesenheit solcher Viren allerdings nicht bestätigen. Andererseits hat eine Gruppe in Kanada in einem großen Teil ihrer Proben diese Erreger nachgewiesen. Was das zu bedeuten hat, lässt sich im Moment schwer beurteilen. Das Expertennetzwerk der WHO hat die Paramyxoviren noch auf der Verdachtsliste. Außerdem steht eine eventuelle Mehrfachinfektion im Raum, und auch die Möglichkeit einer bakteriellen Infektion mit Clamydien wird weiter verfolgt. Die Leithypothese ist aber zur Zeit die, dass ein Coronavirus SARS verursacht. Dafür gibt es immer mehr Beweise. Hundertprozentig sicher können wir aber noch nicht sein.

Spektrum: Ermöglichen die bisherigen Untersuchungen schon Ansätze für eine gezielte Behandlung?

Drosten: Nein, momentan leider noch nicht. Das muss man ganz klar so sagen. Aber wir haben jetzt ein Virus, und damit kann man anfangen Versuche zu machen, also etwa bereits zugelassene antivirale Substanzen auf ihre Wirksamkeit testen. ◁

Das Interview führte Stefanie Reinberger, Biologin mit Schwerpunkt Virologie.

AM RANDE

Verrückt durch Rudern im Weltraum

Seit jeher träumt der Mensch von Vehikeln, die ihm die Mühsal des Laufens ersparen oder – besser noch – ihn vom Erdboden abheben und schwerelos durch den Raum gleiten lassen. Wie schon die Erfindung des Rades zeigt, ist dabei die Natur nicht immer Vorbild. Gewiss, in Wasser kommen Frösche und Menschen durch geschicktes Strampeln vorwärts, in Luft fliegen Vögel durch kompliziert verdrillte Flügelschläge. Aber spätestens im Vakuum des Weltraums ist Rucken und Zucken, Zappeln und Flattern völlig vergebens; da hilft nur das gute alte Rückstoßprinzip.

Demnach gilt: Wer im All nach vorne kommen will, muss etwas nach hinten werfen. Beim Raketenantrieb sind das die ausgestoßenen Verbrennungsgase. Ein Weltraumspaziergänger kann seinen Schraubenschlüssel opfern, um sich einem entgegen der Wurfrichtung gelegenen Ziel zu nähern. Doch unweigerlich geht ihm dadurch das geworfene Objekt verloren – so wie der Rakete ihr Treibstoff. Der Impulserhaltungssatz lässt sich auch nicht austricksen, indem der Raumfahrer etwa, wie einst von einem Leser dieser Zeitschrift vorgeschlagen, den fortgeschnellten Gegenstand an einem in weiser Voraussicht angebrachten Bindfaden wieder zurückholt. Denn was er zieht, das zieht auch ihn, und am Ende sind Werfer und Wurfobjekt wieder genau dort, wo der Wurf begann.

Dennoch hat ein Forscher kürzlich zumindest auf dem Papier gezeigt, wie man im Weltall auch ohne Rakete von der Stelle kommen könnte (Science, 21.3. 2003, S. 1865). Der Trick besteht darin, die »Krümmung« des Raumes zu nutzen. Wie der Physiker Jack Wisdom vom Massachusetts Institute of Technology vorrechnet, kann eine Weltraumgaleere mit (mindestens) drei »Rudern« auf diese Weise durch kalkuliertes Verändern der Ruderlängen und Winkel ihren Ort geringfügig in eine gewünschte Richtung verrücken. Dazu müssen die wackeren Raumschiffer die immer gleichen Paddelbewegungen unermüdlich wiederholen – mit fast unendlicher Geduld.

Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie verformen Massen die vierdimensionale Raumzeit in ihrer Umgebung – und zwar umso stärker, je größer sie sind. Bei den im Kosmos üblichen kleinen Massen und deren riesigen Abständen ist das All jedoch fast überall ziemlich platt. Da mögen sich die Raumruderer noch so in die Riemen legen, die Galeere käme trotzdem nicht vom Fleck. Nur in der Nähe sehr massereicher Himmelskörper – vorzugsweise Neutronensterne oder Schwarze Löcher – könnte das Strampeln etwas bringen. Denn dort macht es wegen der starken Raumkrümmung einen Unterschied, wo das Ruder gerade eintaucht.

Doch selbst hart am Rande eines Schwarzen Lochs wäre der Lohn der Mühe erbärmlich. Auch bei einer extremen Raumzeit-Verzerrung, die der Krümmung der Erdoberfläche entspricht, käme die Galeere nach Wisdoms Berechnung je Ruderschlag nur 10^{-23} Meter voran. Bei diesem Tempo würde das Gefährt für das Durchqueren eines Atomdurchmessers etwa so viel Zeit brauchen, wie seit dem Auftreten des Neandertalers vergangen ist.

Hinzu kommt, dass jedes Objekt bei Annäherung an eine große Masse ohnehin so stark beschleunigt wird, dass der winzige Effekt des Ruderns in der Gesamtbewegung völlig untergeht. Um ihn überhaupt bemerkbar zu machen, müsste Wisdoms Jolle in eine enge Kreisbahn um das Massemonster einschwenken. Dann ließe sich das Paddeln gerade mal für minimale Korrekturen des Bahnradius einsetzen.

Darum werden wohl auch in ferner Zukunft keine Raum-Galeeren mit majestätischem Ruderschlag durchs Weltall ziehen. Als überraschender relativistischer Effekt verdient Wisdoms Fund aber einen Ehrenplatz im Museum der Gedankenexperimente.

Michael Springer

Der Autor ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

SPIELTHEORIE

Entscheidung unter Unsicherheit – die Ergebnisse

Das Spektrum-Gewinnspiel vom November 2002 stellte die Teilnehmer vor eine schwierige Wahl. Nach langem Nachdenken erweist es sich als die bessere Strategie, unkooperativ zu sein – vorausgesetzt, alle anderen denken genauso lange nach.

Von Antonio Cabrales
und Rosemarie Nagel

Ein Handyhersteller *H* möchte Mobiltelefone mit einer Zusatzausstattung für Telefonspiele auf den Markt bringen. Diese Investition wird reichen Ertrag abwerfen – aber nur, wenn zugleich ein anderer Hersteller *S* in die zugehörige Spielesoftware investiert. Stattdessen könnte jeder der beiden sein Vermögen auch an der Börse anlegen. Das bringt unter sehr günstigen Umständen ungefähr so viel ein wie die Telefonspiele, wahrscheinlich aber weniger.

Aus irgendwelchen Gründen können die beiden Hersteller keinen bindenden Kooperationsvertrag abschließen. Vielmehr muss *H* sich überlegen, ob *S* freiwillig mitzieht, weil er die Investition in die Spielesoftware für aussichtsreicher hält als eine Anlage an der Börse. Dessen Einschätzung hängt wiederum davon ab, ob *S* darauf vertrauen kann, dass *H* in die Handyausstattung investiert, und so weiter. Denn wenn der eine sein Geld in das Projekt steckt und der andere nicht, steht Ersterer mit leeren Händen da.

Wie werden sich beide entscheiden? Wie kommt der eine zu einer brauchbaren Einschätzung über die Einschätzung des anderen? Offensichtlich ist das gemeinsame Projekt (»*P*«) für jeden der beiden umso attraktiver, je schlechter sich die Alternative Börsenanlage (»*A*«) darstellt. Über die Zukunft der Börse haben beide zwar annähernd dieselben Informationen, aber nicht ganz. Wie weit beeinflusst die Unsicherheit über den Kenntnisstand des anderen die eigene Entscheidung?

Es zählt zu den Merkwürdigkeiten des Wirtschaftslebens, dass für Koordinationsprobleme dieser Art die Realität nur eine untergeordnete Rolle spielt. Wenn hinreichend viele Kunden befürchten, dass ihre Bank demnächst zusammenbrechen werde, ist es für mich als Kunden derselben Bank belanglos, ob die Befürchtung den Tatsachen entspricht oder nicht. Ich sollte mich in jedem Falle beeilen, mein Geld abzuheben, solange noch welches da ist.

Oder noch krasser: Wenn in einem imaginären Land namens Olivien die Überzeugung herrscht, ein vermehrtes Auftreten von Sonnenflecken werde auf geheimnisvolle Weise den Kurs des olivianischen Peso ins Bodenlose stürzen lassen, dann ist das geeignetste Instrument zur Marktanalyse das Fernrohr. Auch der rationalste Finanzfachmann wird sorgfältig die Sonne beobachten und beim ersten Anzeichen vermehrter Sonnenflecken seine Pesos in Dollar umtauschen. Das tun alle, woraufhin der Kurs des Peso ins Bodenlose stürzt und die abstruse Theorie bestätigt.

Für und Wider einzelner Strategien

In derart komplizierten Situationen, denen mit Hilfe einer Theorie kaum beizukommen ist, versprechen Experimente Aufschluss. Man präsentiert den Versuchspersonen eine auf das Wesentliche reduzierte, vereinfachte Form der Entscheidungssituation und fragt sie nach ihrer Wahl.

Ein solches Experiment haben wir im letzten November den Lesern dieser Zeitschrift angeboten (Kasten links); an dem Spiel nahmen 392 Personen teil. Außerdem haben wir im Jahre 1999 zusammen mit Roc Armenter von der Northwestern University in Evanston (Illinois) dasselbe Experiment im Labor mit 32 Studenten durchgeführt. Die Antworten beider Studien ähneln sich sehr, trotz der erheblichen Unterschiede in der Versuchsdurchführung (Kasten auf Seite 16).

Die Kommentare der Teilnehmer, von der schlichten Phrase »schlechte Erfahrungen mit Teamwork« bis zur elfseitigen Abhandlung, geben ein gutes Bild der Widersprüche, denen sie sich ausgesetzt sahen. Ditmar Bezin wählte *PPPPP*, »weil der Wert von 80 bei *P* kaum durch den unsicheren Wert von *A* getoppt werden kann. Wenn alle Mitspieler so denken und auf *P* setzen, kann jeder eigentlich nur gewinnen!«

Das ist zweifellos richtig, nur denken keineswegs alle so; vielmehr sind die *PPPPP*-Wähler eine klägliche Minderheit. Valentin Schmid begründete seine Wahl *AAAAA* wie folgt (und war sich darin ei- ▷

Zur Erinnerung

Das Gewinnspiel

Im Novemberheft stellten wir unseren Lesern ein Koordinationsspiel unter Unsicherheit vor. Zwei Spieler haben dabei die Wahl zwischen *A* (Alleingang) und *P* (Projekt). Wer sich für *A* entscheidet, erhält unabhängig von der Wahl des anderen eine unbekannte Auszahlung *X*, die aus den Werten 50, 60, 70, 80 oder 90 Euro mit gleicher Wahrscheinlichkeit gezogen wird. Ein *P*-Wähler bekommt 80 Euro, wenn der andere *P* wählt, und 0 Euro, wenn der andere *A* wählt. Jeder Spieler erhält über *X* eine Prognose, die gleich dem Wert von *X* ist oder um 10 Euro nach unten oder oben davon abweicht (allerdings kann sie nicht unter 50 und nicht über 90 liegen). Bei gegebenem *X* hat jede mögliche Prognose die gleiche Wahrscheinlichkeit, gezogen zu werden.

Aus dem Blickwinkel des einzelnen Spielers addieren sich die Prognose-

Gewinnprognose	Auszahlung *X*
schwach	50 oder 60
durchwachsen	50 oder 60 oder 70
mäßig	60 oder 70 oder 80
gut	70 oder 80 oder 90
hervorragend	80 oder 90

unschärfen: Wenn ein Spieler die Prognose »mäßig« erhält, ist für seinen Partner jede beliebige Prognose denkbar, denn *X* könnte 60, 70 oder 80 sein.

Wir wollten von unseren Lesern wissen, welche Wahl sie für jede Prognose treffen würden, wenn sie das Spiel nur einmal mit einem völlig Unbekannten zu spielen hätten.

Die Kooperationsbereitschaft lässt langsam nach

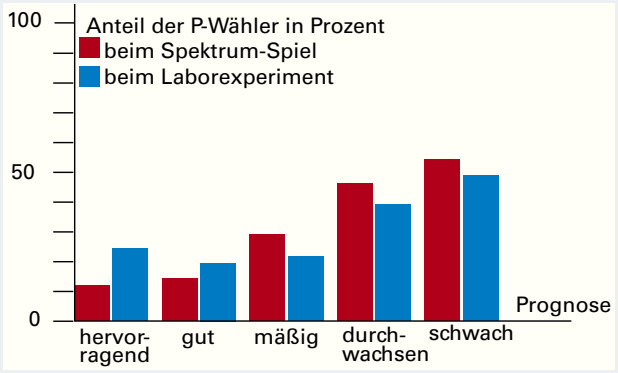
Offensichtlich ist ein Alleingang (Spielzug *A*) umso attraktiver, je höher der in Aussicht gestellte Lohn *X* ist. Wer also etwa bei der Prognose »mäßig« *A* sagt, hat allen Anlass, das auch für jede bessere Prognose zu tun. Entsprechend wäre es unlogisch, beispielsweise für die Prognose »gut« *P* zu wählen und für schlechtere Prognosen *A*. Die einzig sinnvollen Strategien sind also *AAAAA*, *AAAAP*, *AAAPP*, *AAPPP*, *APPPP* und *PPPPP*. Dabei ist zum Beispiel *AAPPP* zu lesen als »*A* für hervorragend, *A* für gut, *P* für mäßig, *P* für durchwachsen und *P* für schwach«. Unter den Teilnehmern des Spektrum-Gewinnspiels entschieden sich 95 Prozent für eine dieser Strategien; wahrscheinlich haben die übrigen ihre Antworten versehentlich in der umgekehrten Reihenfolge abgegeben.

Aus den Teilnehmern des Spiels haben wir vier Paare ausgelost und die Strategien jedes Paares nach den Regeln des Spieles gegeneinander antreten lassen. Die nachstehende Tabelle zeigt die Ergebnisse (spielentscheidende Wahl gefettet).

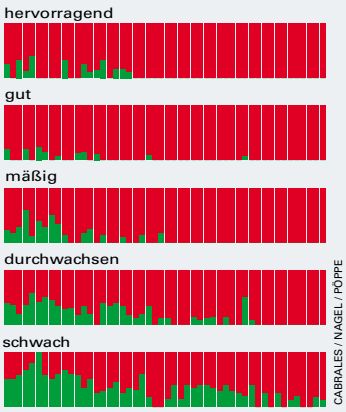
Name	Strategie	X	Prognose	Auszahlung
Claudia Füsers	*AAA**A**A*	60	durchwachsen	60
Reto Müller	*AAP**P**P*		durchwachsen	0
Sebastian Heidenreich	*AA**A**AA*	80	mäßig	80
Gerit Hoppe	***A**APPP*		hervorragend	80
Philip Rebensburg	*AAAA**P***	60	schwach	80
Daniela Paller	*APPPP*		durchwachsen	80
Dirk Koßmann	***PP**AAA*	90	gut	0
Michael Lustenberger	***A**AAAA*		hervorragend	90

In dem Laborexperiment im Jahre 1999 spielte jede von 32 Versuchspersonen das Spiel fünfzigmal mit wechselnden Gegnern. Pro Durchgang erhielt jeder Spieler eine zufällig ausgewählte Prognose und hatte etwa fünf Minuten Bedenkzeit pro Zug. Die Gewinne wurden in spanischen Peseten ausgezahlt (eine Peseta sind ungefähr 0,6 Eurocent).

Trotz der Unterschiede im Versuchsaufbau sind die Ergebnisse beider Studien sehr ähnlich, wenn man das Spektrum-Spiel mit der ersten Runde des Laborexperiments vergleicht.



Beim Laborexperiment nahm aber auf die Dauer die Bereitschaft ab, sich für *P* zu entscheiden. Offenbar ist die Hoffnung der *P* wählenden Teilnehmer, einen gleich gesinnten Partner zu finden, oft enttäuscht worden. Die Grafik rechts zeigt für jede Runde den Anteil der *P*-Spieler (grün) und der *A*-Spieler (rot), aufgegliedert nach Prognosen.



▷ nig mit der Mehrheit der *AAAAA*-Wähler): »Falls ich ausgelost werde, hab ich auch sicher was gewonnen.« Claus Schäfer hat »per Programm jede Strategie gegen jede andere spielen lassen. Ist die Immer-*A*-Strategie dabei, ist sie am aussichtsreichsten. Fehlt sie aber, so gewinnt die Strategie *AAAAP*, für die ich mich aus ›ästhetischen‹ Gründen entschieden habe.« Elsa Romfeld berechnete, dass die erwartete Auszahlung – ohne Berücksichtigung der Prognose – bei Strategie *AAAAA* 70 Euro beträgt; um diesen Wert mit einer *P*-Strategie zu erreichen, müssten sieben von acht Mitspielern *P* wählen, »was sehr unwahrscheinlich ist«.

Wer wie Anke Römer annimmt, dass »die Spektrum-Leser keineswegs auf den Kopf gefallen sind und zu ähnlichen Schlussfolgerungen kommen wie ich«, landet bei der Strategie *AAAAA*, indem er die Prognosen der Reihe nach, von »hervorragend« bis »schwach«, durchgeht und in jedem Fall die Strategie *P* ausschließt. Etwa dreißig Prozent der *AAAAA*-Wähler wandten dieses Verfahren an, das in der Spieltheorie als »iterative Elimination dominierter Strategien« bekannt ist.

Ein rationales Ausschlussverfahren

Eine Strategie heißt »dominiert«, wenn es stets eine andere gibt, die eine bessere Auszahlung einbringt, einerlei was der Partner tut. Eine dominierte Strategie ist also unter allen Umständen die schlechtere Wahl; deswegen kann man sie auch weglassen (»eliminieren«). Anstelle des ursprünglichen Spiels betrachtet man ein reduziertes Spiel, in dem die dominierte Strategie nicht mehr zur Verfügung steht – und zwar beiden Partnern, denn das Spiel ist symmetrisch, und man unterstellt, dass der eine Spieler so rational ist wie der andere. Im reduzierten Spiel erweist sich dann möglicherweise eine Strategie als dominiert, die es im ursprünglichen Spiel noch nicht war. Diese ist ebenfalls zu eliminieren und so weiter.

In unserem Falle verläuft der Eliminationsprozess so:

▶ Bei der Prognose »hervorragend« ergibt *P* unter allen Umständen eine schlechtere Auszahlung als *A* und wird deshalb als dominierte Strategie aus der Betrachtung eliminiert.

▶ Bei der Prognose »gut« ist die erwartete Auszahlung bei der Wahl *A* 81,4 (nämlich 90 mal der Wahrscheinlichkeit von 3/7, dass $X = 90$ ist, plus die entsprechen-

den Terme für $X=80$ und $X=70$), während die Wahl P bestenfalls 80 einbringen kann. Wieder ist P dominiert und scheidet aus den Überlegungen aus.

▶ Bei »mäßig« kommt es auf die Entscheidung des Partners an. Dieser erhält mit einer Wahrscheinlichkeit von 1/3 die Prognose »hervorragend« oder »gut« und wählt – siehe oben – in diesen Fällen A. Unter der optimistischen Annahme, dass er sich in allen anderen Fällen für P entscheidet, kann ich bei Strategie P höchstens mit einer Auszahlung von $(1–1/3) \times 80 = 53{,}3$ rechnen. Dagegen beträgt für A die erwartete Auszahlung 70, und wieder ist die Strategie P dominiert.

▶ Ähnliche Rechnungen zeigen, dass auch bei den Prognosen »durchwachsen« und »schwach« P die schlechtere Wahl ist – immer aus dem Blickwinkel eines rationalen Spielers, der auch seine Mitspieler für rational hält.

Die einzige Strategie, die den iterativen Eliminationsprozess überlebt, ist *AAAAA*. Der Zustand, in dem sich beide Spieler dafür entscheiden, ist das, was die Spieltheoretiker ein Gleichgewicht nennen: Beide Teilnehmer verharren in diesem Zustand, weil eine einseitige Abweichung dem Abweichler nichts einbringt.

Der Glaube an das Schlechte siegt

Das Endergebnis ist ebenso ernüchternd wie beim notorischen Gefangenendilemma (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 52): Die schlechte Alternative A setzt sich gegen die bessere Lösung P durch, weil beide Spieler Grund haben zu fürchten, dass der jeweils andere die schlechte wählen wird.

Dabei kann diese Befürchtung aus völlig irrealen Gründen gespeist sein. Nehmen wir an, die Wirtschaftslage sei generell schlecht, aber das sei den Leuten nicht klar. Beispielsweise würde der Versuchsleiter das Experiment genauso darstellen wie zuvor, aber verschweigen, dass der Bereich für die X-Werte nur 50 bis 70 statt 50 bis 90 Euro beträgt. Wenn die Spieler das wüssten (und einander nach wie vor für rational hielten), hätten sie allen Anlass, P zu spielen; mangels Information ist jedoch die Wahl A genauso wohlbegründet wie zuvor. Auch einem Spieler, der Bescheid weiß, bleibt nichts anderes übrig, als sich für A zu entscheiden, solange er alle seine Mitspieler für uninformiert halten muss. Wenn alle an den Einfluss der Sonnenflecken glauben, muss man sich an die Sonnenflecken halten.

Die Teilnehmer unseres Laborexperiments haben im Verlauf der fünfzig Runden gelernt, die Strategie A zu bevorzugen, und zwar nicht unbedingt, weil sie den Eliminationsprozess gedanklich vollzogen hätten, sondern schlicht durch Anpassung an das Verhalten ihrer Mitspieler. Immerhin ist es interessant zu beobachten, dass die kooperative Strategie P um so schneller schwindet, je früher sie im Eliminationsprozess als dominiert ausscheidet. Je schlechter die Prognose, desto mehr Denkschritte – oder mehr Erfahrung – sind erforderlich, um zu der Entscheidung A statt P zu kommen.

Die Ergebnisse des Spektrum-Spiels – mit nur einer Runde, aber beliebig langer Bedenkzeit – zeigen, dass eine starke Minderheit bereits durch Nachdenken zu der Strategie *AAAAA* kommt. Wahrscheinlich ist diese Form des Spiels sogar realitätsnäher. Wer hat im echten Leben schon Gelegenheit, aus fünfzig Wiederholungen der gleichen Situation zu lernen?

Da intensives Nachdenken Anlass gibt, sich für die schlechtere Alternative zu entscheiden, leuchtet ein, was stattdessen dem Guten zum Durchbruch verhelfen kann: ein Denkfehler. Das aber nur dann, wenn er allgemein üblich ist. In der Wirtschaftswissenschaft spricht man von »begrenzt rationalem Verhalten«.

Solche Denkfehler gibt es durchaus. So unterstellt man meist unbewusst, der Partner verfüge über dieselben Informationen wie man selbst, und übersieht damit die Möglichkeit, dass er eine bessere Prognose erhält. Sowie jedoch (scheinbar) vollständige Information über den Wert von X vorliegt, vermag eine Präferenz für A im einen Fall die anderen Fälle nicht mehr zu »infizieren«, sodass zumindest für schlechte Prognosen die Präferenz für P erhalten bleiben kann.

Ein anderer geläufiger Denkfehler besteht darin, den Eliminationsprozess vorzeitig abzubrechen. Auch das war in den Kommentaren der Einsender zu beobachten. Aber wieder gilt: Rational handelt, wer die Gedanken seiner Mitspieler – seien diese fehlerhaft oder nicht – richtig einschätzt. Wenn der rationale Spieler im Prinzip in derselben Situation steckt wie seine Mitspieler, muss er so handeln, als ließe er sich von den gleichen Gedanken – fehlerhaft oder nicht – leiten wie diese.

Ein Modell des Wirtschaftsgeschehens soll eindeutige Vorhersagen erlauben, um anwendbar zu sein. Den Theoretikern gelingt es, durch die Einfüh- ▷

Im Mai bei wissenschaft-online

wissenschaft-online

»Zu Beginn des neuen Jahrtausends stehen die Geowissenschaften vor großen Herausforderungen« – mit diesem Satz beginnt das sechsbändige Lexikon der Geowissenschaften. wissenschaft-online stellt im Mai die Geowissenschaften in den Vordergrund, alle aktuellen Meldungen sind auf www.wissenschaft-online.de/geowissenschaften frei zugänglich.

Die täglichen Nachrichten aus der Wissenschaft werden ergänzt durch informative Reportagen. So begleitet wissenschaft-online – Redakteur Joachim Schüring die Marineflieger aus Nordholz bei ihren Flügen zur Überwachung von Meeresverschmutzungen.

Das Verständnis aktueller Informationen verlangt Grundlagen. Neben dem Lexikon der Geowissenschaften bietet wissenschaft-online den Zugang zum Lexikon der Geographie sowie der Kartographie und Geomatik mit insgesamt über 34.000 Stichwörtern.

www.wissenschaft-online.de

▷ rung von Informationsunschärfen, etwa in Form unserer ungenauen Prognosen, manchen Modellen diese hoch erwünschte Eigenschaft zu verschaffen.

Nehmen wir unser Spiel mit vollständiger Information über X statt der vagen Abschätzung. Dann gibt es manchmal zwei Gleichgewichte, und mit der Theorie ist nicht vorherzusagen, welches von beiden sich einstellen wird. Diese Zweideutigkeit wird durch die geschilderte Unschärfe aufgehoben. Denn bei vollständiger Information sind für X=70, 60 oder 50 (mäßig, durchwachsen oder schwach) sowohl *(A,A)* als auch *(P,P)* Strategiekombinationen, von denen keiner einseitig zu seinem Vorteil abweichen kann, das heißt Gleichgewichte. Dagegen ist im Spiel mit Informationsunschärfe *(A,A)* ein eindeutig bestimmtes Gleichgewicht. Für diesen Fall sagt die Theorie voraus, dass das Verhalten der Menschen gegen dieses Gleichgewicht konvergiert.

Unsere Experimente haben – für dieses Spiel – die Theorie bestätigt. Das ist allerdings keineswegs immer der Fall. Scheinbar belanglose Effekte können die ansonsten übermächtige Tendenz zum Gleichgewicht außer Kraft setzen; das bekannteste Beispiel ist das iterierte Gefangenendilemma. Welche dieser Einflüsse eine Rolle spielen und welche nicht – das sind Fragen, zu deren Klärung Experimente wie das unsere dienen sollen. ◁

Antonio Cabrales und **Rosemarie Nagel** sind Professoren an der wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Pompeu Fabra in Barcelona.

GLOSSE

Ein Diamant ist unvergänglich

Neue Optionen für ein Leben nach dem Tode

Ich habe es nicht genau nachgerechnet, aber irgendwann in den letzten Monaten war die Hälfte der mir statistisch zustehenden Lebenserwartung verstrichen. Nicht dass ich daraus jetzt eine Krise machen will, aber es ist vielleicht ein passender Zeitpunkt, darüber nachzudenken, was wird, wenn der oberste Schiedsrichter auch die zweite Halbzeit abpfeift.

Da kam mir ein Artikel in der britischen Presse gerade recht, der vermeldete, dass eine amerikanische Firma neuerdings die Asche Verstorbener in Diamanten verwandelt. Für einen einkarätigen Klunker soll der Preis bei schlappen 22 000 Dollar liegen. Im Hinblick auf langfristige Haltbarkeit ist diese Form der Unsterblichkeit natürlich kaum zu überbieten. Zwar ginge dabei der gesamte Informationsgehalt meines Biomaterials zusammen mit dem Stickstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Schwefel durch den Schornstein, aber zumindest meine Kohlenstoffatome (oder ein Teil von ihnen, je nach Kassenstand) blieben der Nachwelt erhalten. Wahrscheinlich würde mein so komprimierter Körper noch funkeln, wenn sich meine gesamten gedruckten Gedanken bereits in Kohlendioxid verwandelt haben.

Der Haken an der Sache ist natürlich, dass meine sterblichen Überreste in Diamantform genauso aussehen werden wie die eines jeden x-beliebigen anderen Kunden der Firma LifeGem. Von der Möglichkeit der Verwechslung ganz abgesehen, steht diese posthume Uniformität in eklatantem Widerspruch zu dem Individualismus, dem ich zu Lebzeiten stets gehuldigt habe.

Also sollte ich vielleicht doch eine etwas vollständigere Konservierung ins Auge fassen. Auch kein Problem: In Scottsdale (Arizona) gibt es die Alcor Life Extension Foundation, die Frischverstorbene in flüssigem Stickstoff einfriert – mit dem Versprechen, sie wiederzubeleben, sobald die Fortschritte der Medizin das ermöglichen. (Und sollte jemals das dringende Bedürfnis nach einer Klonkopie von mir auftauchen, fände sich in meinem tiefgefrorenen Körper genug DNA für zahllose Versuche.) Das Dumme ist nur, dass ich die Firma nicht verklagen kann, wenn sie das Versprechen nicht hält, denn dann lagere ich immer noch mausetot im Tiefkühltank. Und

was passiert, wenn Alcor pleite macht und keiner mehr da ist, Flüssigstickstoff nachzufüllen? Nicht auszudenken.

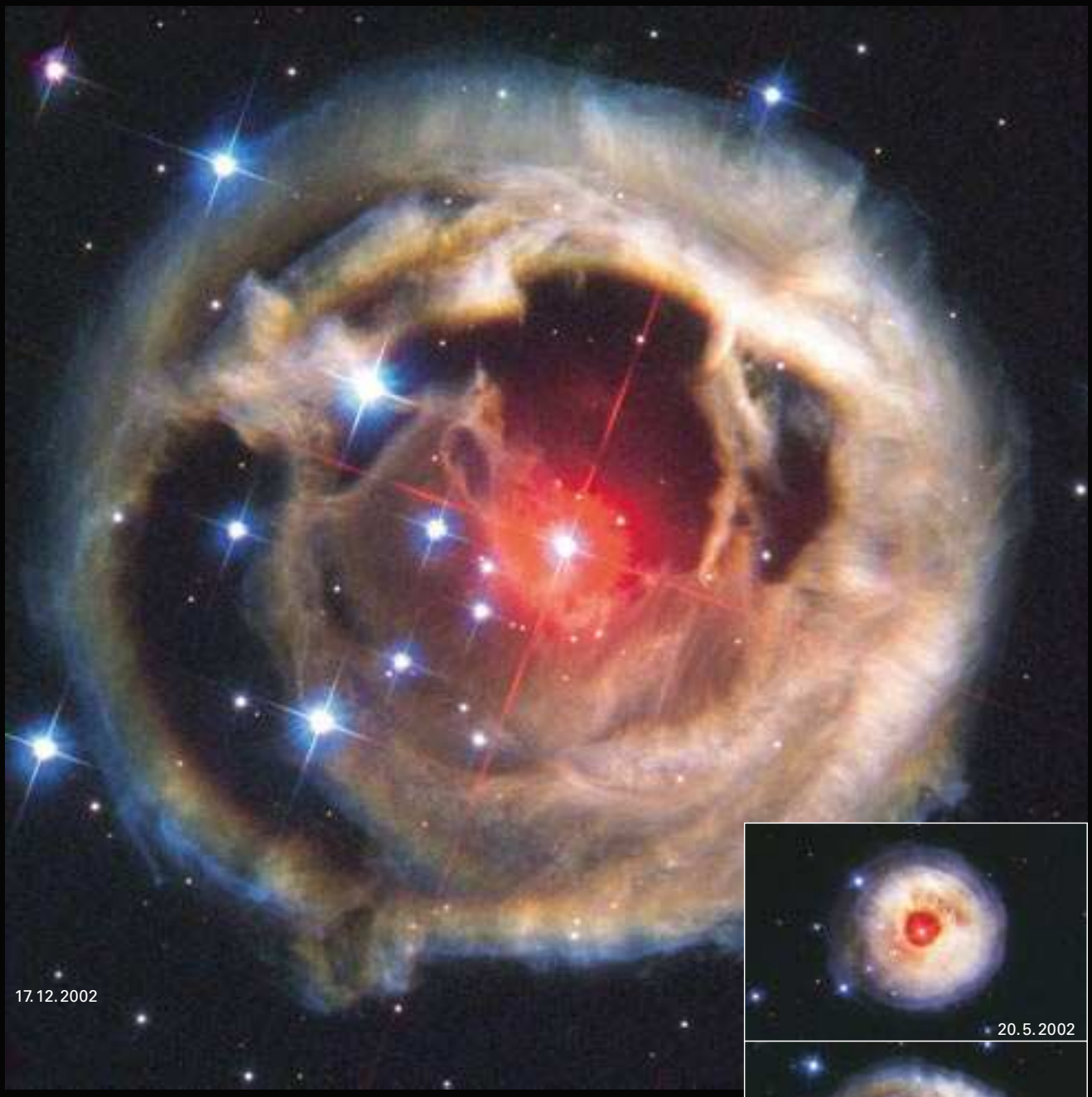
Da wende ich mich doch lieber an Gunther von Hagens. Der Heidelberger Anatomieprofessor braucht meine Körperflüssigkeiten nur gegen seine Plastiklösung auszutauschen, und schon kann ich in ganzer Schönheit weiterhin der Wissenschaftsvermittlung dienen, so wie die Herrschaften in der »Körperwelten«-Ausstellung. Mit meinem Hirn in der Hand oder Herz in der Hose, wie auch immer. Doch halt, der Herr Professor ist ja viel älter als ich, wer weiß ob sein Service noch zur Verfügung steht, wenn ich ihn brauche. Aber vielleicht wird ja dereinst die Plastination bei jedem besseren Bestattungsunternehmen angeboten.

Und dann gibts noch die traditionellen Optionen. Ich kann mich Bodenbakterien und Maden als Festschmaus andienen, bis nur noch meine Knochen in der Erde herumliegen. Oder mich verbrennen und die Asche im Garten / auf hoher See / im Weltraum verstreuen lassen (Nichtzutreffendes bitte streichen). Das eine oder andere Organ mag vielleicht noch jemand anderem nützen. Aber irgendwie ist das alles nicht so recht befriedigend.

Ich glaube, ich bleibe doch bei der Diamant-Option und fange schon mal an zu sparen, damit es auch für ein Steinchen von sichtbarer Größe reicht. Vielleicht lässt sich ja im Zentrum des Brillanten etwas von meiner DNA unterbringen, damit ich in meiner zweiten Existenz nicht gar so verwechselbar dastehe. In der Hinsicht bin ich nämlich empfindlich.

Michael Groß

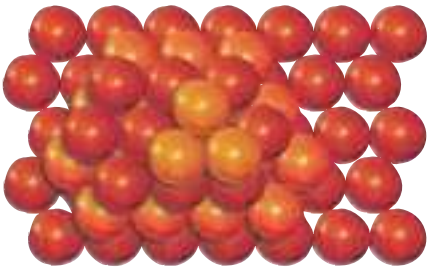
www.michaelgross.co.uk



NASA, ESA UND H.E. BOND (STSCI)

Lichtecho einer Sternexplosion

Ende Januar 2002 flammte ein rund 20 000 Lichtjahre entfernter unbedeutender Stern namens V838 im Sternbild Einhorn (Monoceros) plötzlich auf und wurde kurzzeitig zum lichtstärksten Objekt der Milchstraße. Mit einem Helligkeitsanstieg um den Faktor 10 000 erreichte er die 600 000fache Leuchtkraft der Sonne. Inzwischen ist er wieder verblasst, aber der ausgesandte Lichtblitz beschert Astronomen ein außergewöhnliches Schauspiel. Indem er sich kugelförmig nach allen Seiten ausbreitet, beleuchtet er nach und nach die Umgebung von V838 Monocerotis. Dieses Lichtecho, aufgenommen mit dem Hubble-Weltraumteleskop, enthüllt in faszinierenden Feinheiten die Struktur einer Gas- und Staubhülle, die der Stern offenbar bei früheren Ausbrüchen bereits abgestoßen hat. Wie bei einer Computertomografie entsteht dabei schichtweise ein dreidimensionales Bild des Objekts. Der Ausbruch selbst war ebenfalls ungewöhnlich und gibt noch Rätsel auf. Die Helligkeit stieg stärker an als bei einer Nova, bei der plötzlich eine gigantische Wasserstoff-Fusionsreaktion zündet. Zudem stieß V838Mon nicht seine Hülle ab und entblößte dabei seinen heißen Kern, sondern blähte sich nur gewaltig auf. Forscher vermuten ein bisher unbekanntes Übergangsstadium in der Entwicklung eines alternden Sterns, das wegen seiner Kürze nur selten zu beobachten ist.



Ein Vierteljahrhundert Mathematik

Mathematik ist vielseitiger geworden: Das Arbeitsmittel Computer eröffnet völlig neue Perspektiven, und die Grenzen zwischen den Teildisziplinen verschwimmen.

Von Ian Stewart

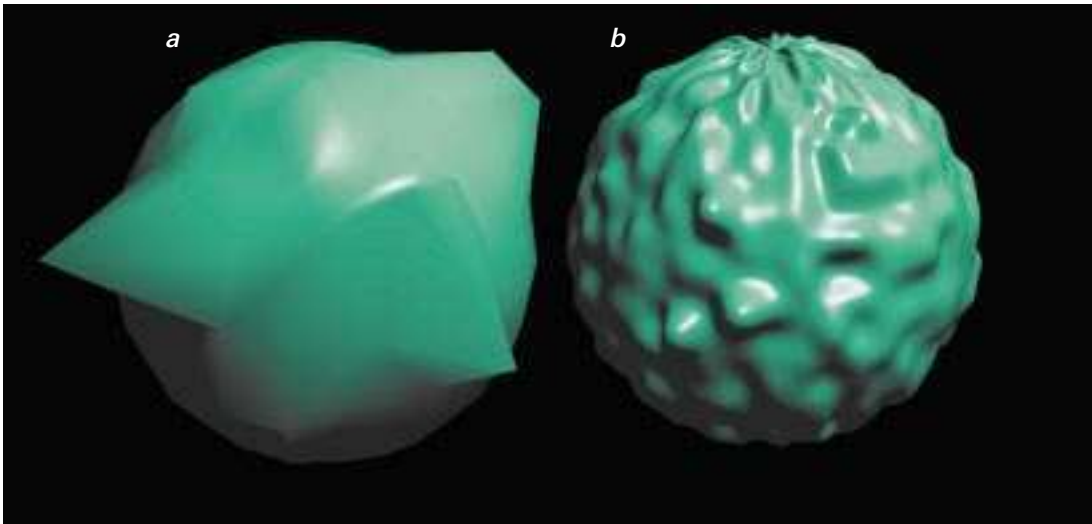
Die Mathematik hat im letzten Vierteljahrhundert ihre Orientierung radikal geändert. Auffälligstes Merkmal ist vielleicht, dass die in den 1950er und 1960er Jahren noch beherrschende Aufspaltung in die Zweige »reine« und »angewandte« Mathematik weitgehend verschwommen ist.

Die beiden Teilgebiete waren zwar weder genau definiert noch klar gegeneinander abgegrenzt; was sie gleichwohl deutlich voneinander unterschied, war der jeweils charakteristische Denkstil. Die »reine« Mathematik war sehr streng, sehr allgemein und schrecklich abstrakt. Der zugehörige Stil ist, ins Extrem getrieben, in den Werken von Nicolas Bourbaki zu bestaunen. Eine Person dieses Namens hat es nie gegeben; Bourbaki war das Pseudonym eines Geheimbundes von Mathematikern, der sich zum Ziel gesetzt hatte, die »Elemente der Mathematik« in ewig gültiger Form in einer Folge von Büchern niederzuschreiben.

Derweil setzte die angewandte Mathematik schamlos die physikalische Intuition an die Stelle der geheiligten logischen Strenge. Sie bemühte sich um spezifische und sehr konkrete Probleme, die im Allgemeinen aus der Technik kamen, gleichwohl aber in recht akademischer Weise behandelt wurden. Ihre Hauptarbeitsgebiete umfassten das gesamte Spektrum der klassischen Physik aus Mechanik, Optik, Akustik, Thermodynamik und Elektrodynamik, mit Schwerpunkt auf der Mechanik von punktförmigen Teilchen (einschließlich der Himmelskörper), ausgedehnten starren Körpern, Flüssigkeiten, Gasen und elastischen Medien.

Darüber hinaus hatte die Mathematik neues Gelände erobert. Die Wahrscheinlichkeitsrechnung lieferte die theoretischen Grundlagen für die Statistik; die Quantenmechanik ist weitgehend ein Zweig der mathematischen Physik. Die lineare Programmierung wurde zum Hauptwerkzeug des neuen Fachgebiets Operations Research; Wirtschaftsmathematik wuchs zu einer eigenen Disziplin heran. Die mathematische Biologie bearbeitete die klassische Genetik und deren Weiterentwicklungen in der Populationsdynamik sowie die Gleichung der Nervenreizleitung.

Im Jahre 2003 hat sich die mathematische Landschaft radikal verändert, auch wenn eini-



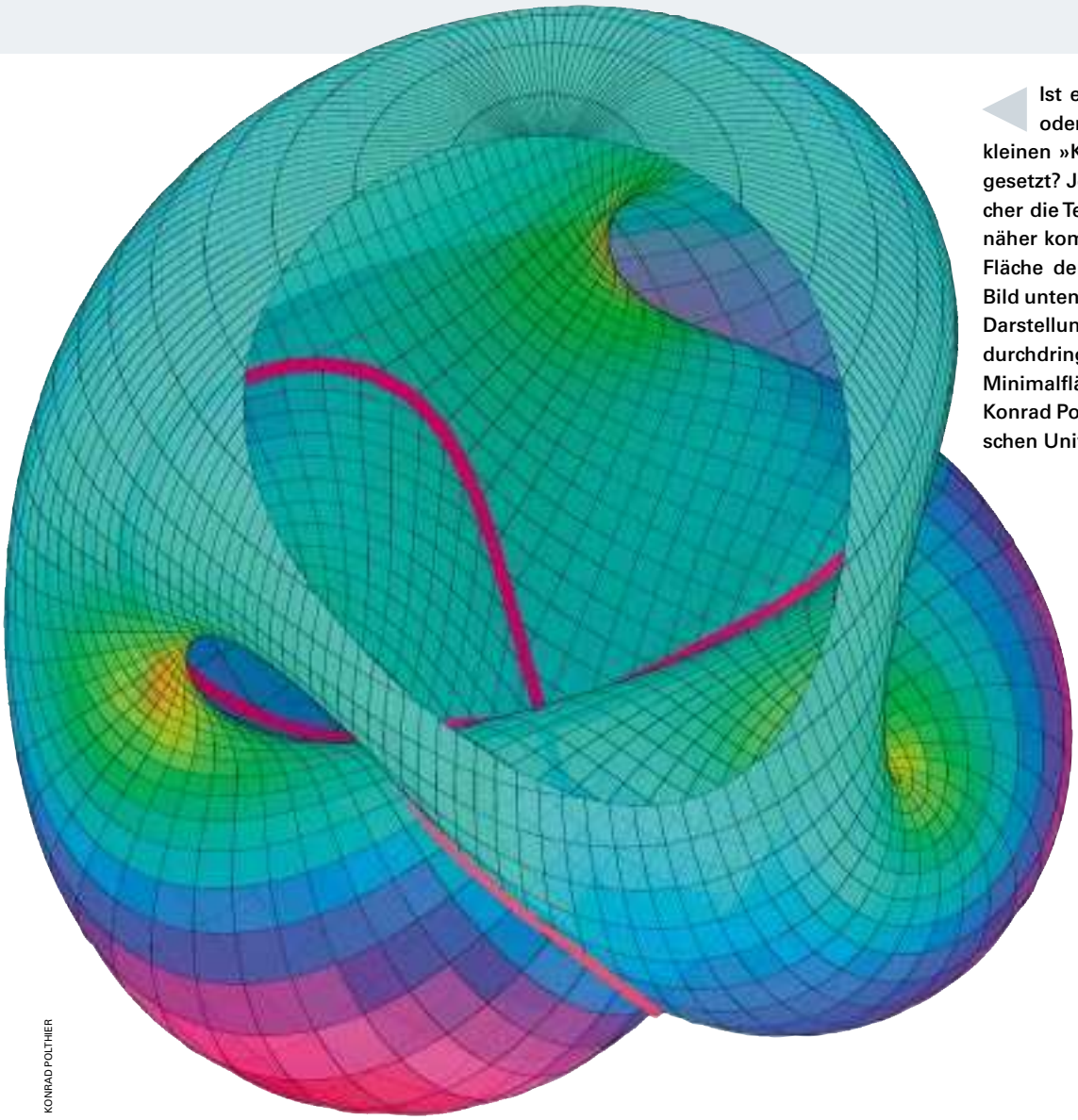
SERIE

25 Jahre Spektrum der Wissenschaft

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik
Teil III: Gehirnforschung
Teil IV: Klimaforschung
Teil V: Mathematisches Denken

Im nächsten Heft
Teil VI: Ultrakalte Atome

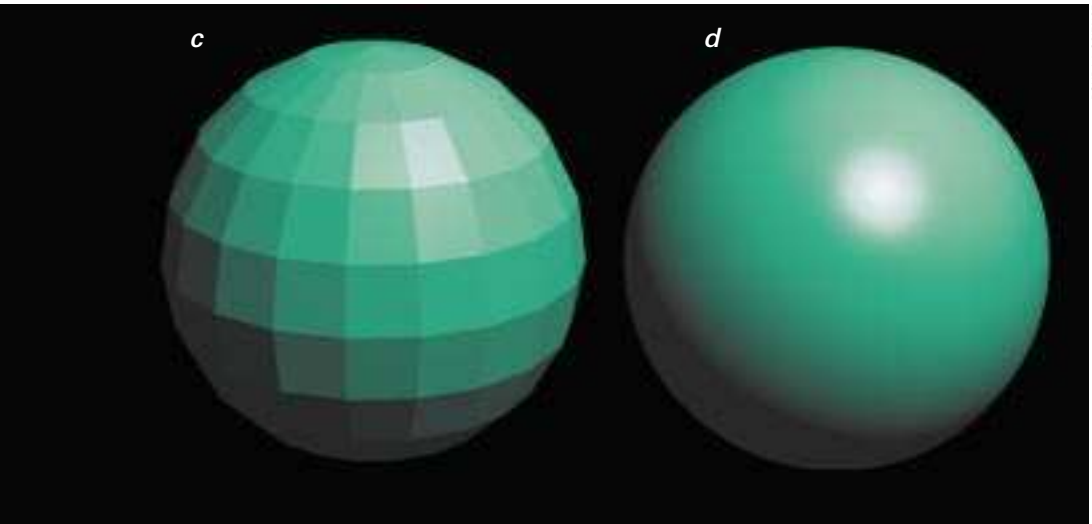


KONRAD POLTHIER

Ist es eine glatte Fläche, oder ist sie aus lauter kleinen »Kacheln« zusammengesetzt? Je kleiner und zahlreicher die Teilflächen sind, desto näher kommt die polyedrische Fläche der glatten (vergleiche Bild unten). Diese polyedrische Darstellung der sich selbst durchdringenden Boy'schen Minimalfläche stammt von Konrad Polthier von der Technischen Universität Berlin.

ge Denkweisen aus den 1960er Jahren heute noch lebendig sind. Physikalische Intuition und formale Abstraktion schauen nicht mehr missgünstig aufeinander herab, sondern koexistieren und ergänzen sich, oft in ein und demselben Forschungsvorhaben. Kurz: Die Mathematik und ihre Anwendungen sind eine Kooperation zu beiderseitigem Vorteil eingegangen. Wenngleich die ersten Ansätze und Versuche in dieser Richtung umstritten waren, verlief dieser Wechsel eher evolutionär denn revolutionär.

Der mathematische Fortschritt hat viele Gesichter. Am augenfälligsten tritt er zutage, wenn ein altes Problem nach langjährigen vergeblichen Bemühungen endlich gelöst wird. Eine zweite Quelle der mathematischen Innovation ist die Entwicklung neuer Begriffe und ▷



POUR LA SCIENCE

Die drei Typen der Topologie: Die stetige Topologie (*a*) handelt von Formen, die Ecken und Kanten haben dürfen, die glatte Topologie (*b*) nur von differenzierbaren Formen und die polyedrische (*c*, siehe auch Bild oben) von solchen, die aus Polygonen zusammengesetzt sind. Die abgebildeten Flächen haben keine Löcher; sie sind alle der Kugeloberfläche (*d*) äquivalent, einerlei welche Topologie man zu Grunde legt.

▷ Theorien. Diese sind zunächst häufig sehr unscheinbar; erst später, wenn sie sich zu einem geschlossenen Ganzen verfestigt haben, wird ihre Bedeutung offenbar. Drittens versetzen zuweilen radikal neue Techniken aus heiterem Himmel die mathematische Gemeinschaft in Erstaunen (Kasten rechts). Auch die Formulierung neuer Probleme bringt die Mathematik voran; schon vor ihrer Lösung lenken sie durch ihre schiere Gegenwart die Forschung in neue Richtungen. Schließlich beleben neue Anwendungsgebiete wie etwa die Biologie die mathematische Forschung, weil sie die Erfindung neuer Begriffe und Techniken auslösen.

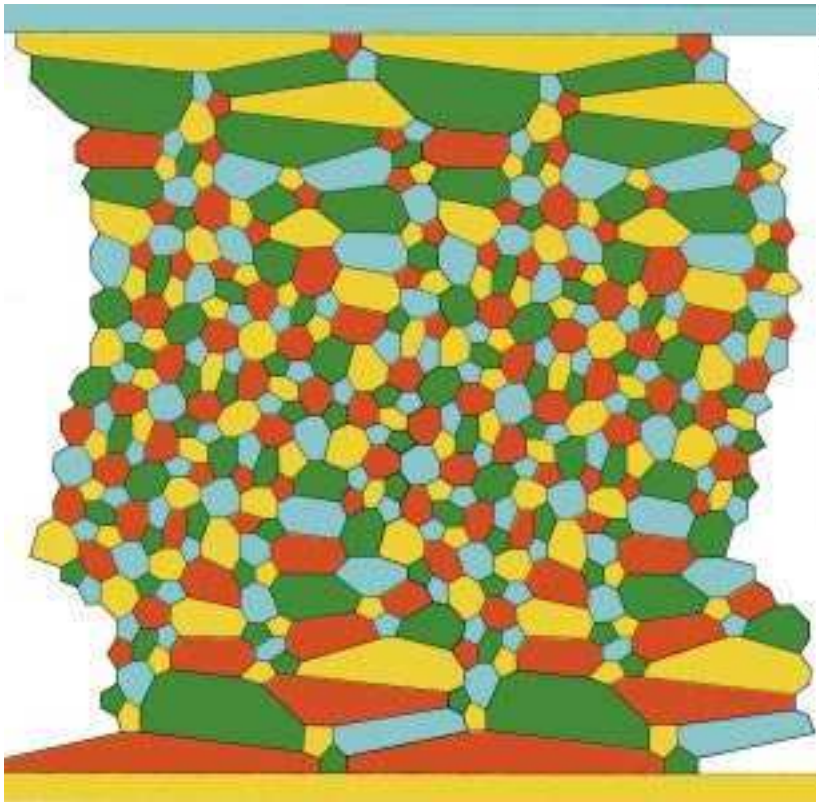
Spektakuläre Eroberungen

In der ersten Kategorie – Lösung hartnäckiger Probleme – gab es in den letzten 25 Jahren zahlreiche große Erfolge zu verzeichnen: ein Beleg für die Kraft und Lebendigkeit der Gegenwartsmathematik. Eines dieser Probleme, »Fermats letzter Satz«, hatte immerhin 350 Jahre lang allen Attacken widerstanden. Gelegentlich wurden diese Erfolge mit Hilfe des Computers errungen, was jedoch nicht als Zeichen der Schwäche aufzufassen ist. Der Computer spielt die Rolle eines Dieners, nicht des Herrn; er ist ein Werkzeug, das den Mathematiker ebenso wenig überflüssig macht wie die Schreibmaschine den Schriftsteller oder der Pinsel den Maler. Im Gegenteil: Indem der Computer Rechenoperationen rein mechanisch ausführt, macht er den Geist des Mathematikers frei für die kreativeren Teile seiner Aufgabe.

Das Paradebeispiel für die Lösung eines Problems mit Computerhilfe ist zwar schon 27 Jahre alt, sei aber hier dennoch angesprochen, weil der Lösungsprozess in jüngster Zeit weitergeführt wurde. Wolfgang Haken und Kenneth Appel gelang es 1976, den berühmten Vierfarbensatz zu beweisen (siehe ihren Artikel in Spektrum der Wissenschaft 10/1978, S. 82). Der englische Student Francis Guthrie hatte 1852 folgende Frage an seinen Bruder Frederick gestellt: Lassen sich auf jeder Landkarte die Länder mit vier oder weniger Farben so färben, dass niemals zwei aneinander grenzende Länder dieselbe Farbe haben (Bild links)? Die Mathematiker konnten schnell zeigen, dass fünf Farben mit Sicherheit genügen. Aber alle Versuche, diese Anzahl auf vier herunterzuschrauben, scheiterten; andererseits fand man keine Karte, für die tatsächlich fünf Farben erforderlich gewesen wären.

Im Jahre 1950 führte Heinrich Heesch ein Verfahren ein, eine Karte so zu verändern, dass die für die Färbung notwendige Anzahl von Farben unverändert bleibt. Mit diesem Verfahren kann man insbesondere die Anzahl der Länder einer Karte so lange vermindern, bis ihre Färbbarkeit mit vier Farben – oder das Gegenteil – offensichtlich wird. Appel und Haken fanden nun eine Liste von ungefähr 2000 »unvermeidlichen Konfigurationen«. Eine Konfiguration ist einfach ein Teilstück einer Karte; dass die Menge dieser speziellen Konfigurationen unvermeidlich ist, bedeutet, dass jede Karte, so kompliziert sie auch sein mag, mindestens eine dieser Konfigurationen enthalten muss. Gäbe es eine Karte, für die man fünf Farben bräuchte, so müsste das auch für mindestens eine der – unvermeidlich – in ihr enthaltenen speziellen Konfigurationen gelten. Appel und Haken wandten das Verfahren von Heesch auf jede der 2000 Konfigurationen an. Wenn der Vierfarbensatz falsch wäre, hätte diese Prozedur bei mindestens einer Konfiguration mit fünf Farben enden müssen. Das war nicht der Fall, womit der Vierfarbensatz bewiesen war. Das Durchprüfen der 2000 Einzelfälle erforderte damals mehrere tausend Stunden Rechenzeit auf einem schnellen Computer. Heute wäre es in weniger als einer Stunde erledigt.

Auf den ersten Blick erscheint die Lösung des Vierfarbenproblems als eine Sackgasse: interessant, schwierig, aber vollkommen isoliert von der restlichen Mathematik. Heute gibt es Anzeichen dafür, dass dieses Problem eben doch tief liegende Verbindungen zu anderen Gebieten hat. Das Verfahren von Heesch hat eine neue, geometrische Interpretation gefunden, womit es auf die Krümmung von Flächen



POUR LA SCIENCE

Auch diese Karte mit 846 Ländern ist so mit vier Farben färbbar, dass nirgends zwei Länder mit gemeinsamer Grenze dieselbe Farbe haben. Die Lösung des Vierfarbenproblems ist charakteristisch für eine Entwicklungslinie der Gegenwartsmathematik: Man führt den zu beweisenden Satz auf eine Anzahl von Einzelfällen zurück (in diesem Fall einige tausend) und prüft jeden Einzelfall mit Hilfe des Computers nach.

anwendbar ist. Neuere Forschungen haben die zu Grunde liegenden Ideen sogar mit so esoterischen Gebieten wie der Quantenfeldtheorie in Zusammenhang gebracht. Anscheinend hat der Vierfarbensatz noch nicht alle seine Geheimnisse preisgegeben.

Fermat, am Rande

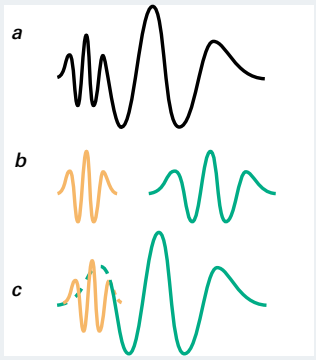
Das populärste unter den jüngst erledigten Problemen ist ohne Zweifel der Beweis der Fermat'schen Vermutung (Spektrum der Wissenschaft 1/1998, S. 96). Pierre de Fermat (1601–1665), Landgerichtsrat in Toulouse und begnadeter Mathematiker, beschäftigte sich um 1637 mit der Zahlentheorie, also mit den Eigenschaften der natürlichen Zahlen wie Teilbarkeit. Dabei bemerkte er, dass es zwar unendlich viele Paare von Quadratzahlen gibt, deren Summe wieder eine Quadratzahl ist, wie $9+16=25$ und $25+144=169$, dass es ihm aber nicht gelang, Entsprechendes unter den Kubikzahlen, den vierten Potenzen und so weiter zu finden. An den Rand seines Exemplars der »Arithmetika« des Diophant notierte er: »Es ist unmöglich, einen Kubus in zwei Kuben, ein Biquadrat in zwei Biquadrate oder allgemein irgendeine höhere Potenz als die zweite in zwei höhere Potenzen gleichen Grades zu zerlegen. Ich habe hierfür einen wahrhaft wunderbaren Beweis gefunden, aber dieser Rand ist zu schmal, ihn zu fassen.« Fermat hat sehr viele solcher Randbemerkungen gemacht, und seine Epigonen fanden für jede dieser Behauptungen einen Beweis, bis auf diese, die als »Fermats letzter Satz« berühmt wurde.

Drei Jahrhunderte lang scheiterten alle Versuche, Fermats Behauptung zu bestätigen oder zu widerlegen. In den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts tat sich dann eine Verbindung zwischen Fermats letztem Satz und einer wesentlichen Frage der Zahlentheorie auf, der Vermutung von Taniyama und Weil. Im Jahre 1993 präsentierte der englische Mathematiker Andrew Wiles nach jahrelanger einsamer Arbeit einen Beweis für den Satz von Fermat, welcher sich auf einen Sonderfall der Taniyama-Weil-Vermutung stützte. In seiner Arbeit wurde ein Fehler gefunden, den Wiles 14 Monate später zusammen mit seinem Kollegen Richard Taylor korrigieren konnte. Damit hatten Wiles und Taylor ein mehr als 350 Jahre altes Problem gelöst. Ihre Arbeit, die keinerlei Gebrauch vom Computer macht, ist ein entscheidender Durchbruch mit zahlreichen Auswirkungen.

Vierfarbensatz und Fermats letzter Satz sind nur die Paradebeispiele unter den mathematischen Durchbrüchen der jüngeren Vergangenheit. Neben vielen weiteren sind vor allem noch zwei zu nennen:

Wavelets

Kleine Wellen mit großer Wirkung



Die Zerlegung eines (Bild- oder Ton-)Signals (*a*) in einfachere Komponenten ist ein Teilgebiet der Mathematik, das im Wesentlichen als abgeschlossen galt. Das Mittel der Wahl war die Fourier-Transformation. Bei einem zeitlich periodischen Signal (einem Ton) läuft sie auf die Analyse nach Grund- und Oberschwingungen hinaus. Die Elemente, in die das Signal zerlegt wird, sind Sinusfunktionen; diese sind periodisch und dauern daher im Prinzip unendlich lange an.

Dagegen sind bei der Wavelet-Transformation, die im letzten Viertel des vergangenen Jahrhunderts ausgearbeitet wurde, die Elemente zwar auch wellenförmig, aber sie schwellen in ihrer Intensität an und wieder ab (*b*). Insbesondere sind sie von begrenzter Dauer und damit »klein«; daher der Name Wavelets (»Wellchen«). Dank dieser Eigenschaft können Wavelets auch unregelmäßige Schwankungen des Signals mit erfreulich geringem Aufwand getreu wiedergeben (*c*).

Eine Wavelet-Darstellung eines Bildes erreicht daher schon mit wenig Daten eine erstaunlich gute Wiedergabe: Bei gleichem Speicherplatzbedarf ist das mit Wavelets kodierte Bild *e* von besserer Qualität als *d*, das durch die herkömmliche Kompression im Format JPEG entstand.

▶ Thomas Hales bewies die Vermutung von Johannes Kepler, die dieser 1611 in einer Arbeit über sechsarmige Schneeflocken formulierte: Die dichteste Kugelpackung ist diejenige, die man in den Auslagen eines Obstgeschäftes sehen kann (Bild links neben der Überschrift; siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 10).

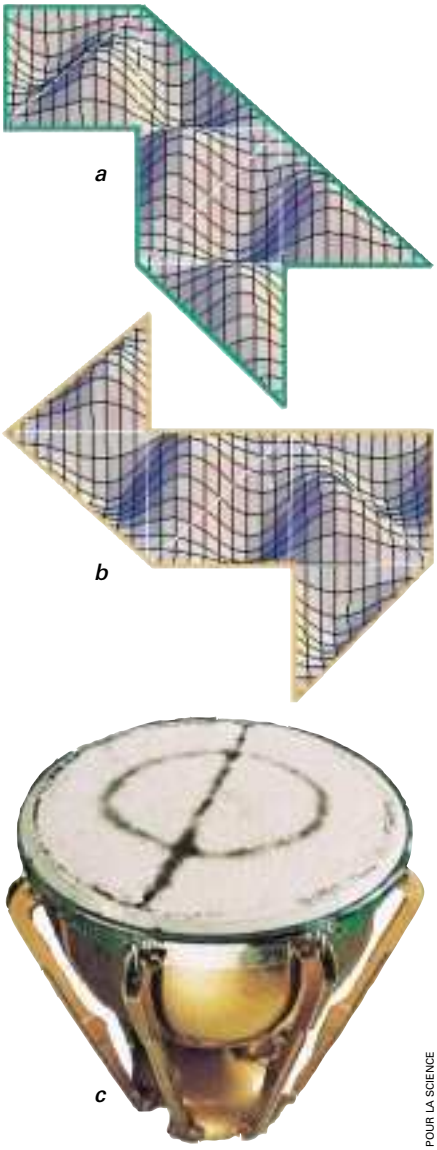
▶ Louis de Branges bewies die Bieberbach'sche Vermutung, die in der Funktionentheorie eine bedeutende Rolle spielt.

Überraschungen in der Topologie

Die eindrucksvollste Entdeckung in der Mathematik des letzten Vierteljahrhunderts betrifft jedoch ein Problem, das noch nicht einmal durch hohes Alter Kultstatus erlangt hatte. Simon Donaldson fand 1983 ein überraschendes Resultat über die Topologie vierdimensionaler Mannigfaltigkeiten.

Die Topologie, welche oft als Gummituchmathematik bezeichnet wird, behandelt jene Eigenschaften geometrischer Formen, welche unter stetigen Deformationen unverändert ▷

Es ist unmöglich, die Form eines Trommelfells zu hören, das heißt seine Gestalt aus dem Spektrum der Eigenfrequenzen zu rekonstruieren (Spektrum der Wissenschaft 12/1992, S. 12). Carolyn Gordon, David Webb und Scott Wolpert fanden 1992 zwei Trommelfelle, die trotz unterschiedlicher Geometrie dieselben Eigenfrequenzen aufweisen: die »Pfeilform« (*a*) und die »Hühnchenform« (*b*). Die Eigenschwingungen lassen sich mit den Kundt'schen Staubfiguren (*c*) sichtbar machen: Der Staub bleibt bevorzugt dort liegen, wo die Amplitude der Schwingungen null ist.



POUR LA SCIENCE

▷ bleiben. Ein geometrisches Gebilde mag beliebig verzerrt, gedehnt, gestaucht oder verwunden werden; solange es nicht aufgeschnitten oder mit sich selbst verklebt wird, gilt es dem Topologen immer noch als dasselbe. Die Oberflächen einer Kugel, eines Eis, eines Kieselsteins und eines Würfels sind alle topologisch äquivalent zueinander. Erst die Oberfläche eines Fahrradschlauchs (Torus) oder einer Brezel ist davon im Sinne der Topologie wesentlich verschieden. Die zentrale Idee der Topologie, die Stetigkeit, ist zugleich eine zentrale Eigenschaft der Natur – jedenfalls sehen die klassischen physikalischen Theorien das so. Aus diesem Grunde ist die Topologie, obwohl ihre Grundbausteine von kindlicher Einfachheit sind, ein tragender Pfeiler der Naturwissenschaft und der Mathematik.

Ihre Untersuchungen beschränken sich nicht auf (zweidimensionale) Flächen in unserem vertrauten dreidimensionalen Raum. Die Verallgemeinerung einer Fläche heißt eine Mannigfaltigkeit; sie kann mehr als zwei Dimensionen haben. Die Stringtheorie in der Physik verwendet Mannigfaltigkeiten mit 10 bis 26 Dimensionen.

Die Topologen unterscheiden drei Arten von Gummi: stetig, glatt und polyedrisch (Bilder Seite 24/25). Schneiden und Kleben ist bei allen Gummisorten nicht erlaubt; aber stetiges Gummi darf Ecken und Kanten haben und damit sehr komplizierte Formen annehmen, während glattes Gummi noch nicht einmal im Verlauf einer Deformation einen Knick bekommen darf. Polyedrisches Gummi dagegen besteht aus lauter ebenen Vielecken, wie ein scharfkantig zerknülltes Stück Papier. Etwas wissenschaftlicher ausgedrückt: Im Gegensatz zu den Mannigfaltigkeiten der klassischen (stetigen) Topologie müssen die der glatten Topologie differenzierbar sein, und die der polyedrischen Geometrie sind aus ebenen Vielecken zusammengesetzt. Zwei Mannigfaltigkeiten sind nur dann äquivalent im Sinne der jeweiligen Topologie, wenn sie stetig so ineinander deformierbar sind, dass jedes Zwischenstadium eine Mannigfaltigkeit dieser Topologie ist.

Es könnte nun sein, dass zwei Mannigfaltigkeiten zwar äquivalent im Sinne der stetigen Topologie sind, nicht aber im Sinne der glatten Topologie. Man könnte sie also ineinander deformieren, aber unter keinen Umständen unterwegs einen Knick (oder Schlimmeres) vermeiden. Nach jahrelangem intensivem Studium kam man zu dem Schluss, dass ein solcher Fall in allen euklidischen Räumen (das sind Verallgemeinerungen der unendlich ausgedehnten Ebene und des unendlichen dreidimensionalen Raums) nicht vorkommt: Für die Frage, ob eine Mannigfaltigkeit der Sphäre (der verallgemeinerten Kugeloberfläche) äquivalent ist, kommt es nicht auf die Gummisorte an. Diese Vermutung konnte in allen Dimensionen ungleich vier bewiesen werden.

Zwar hatte John Milnor 1963 gezeigt, dass dies für nicht-euklidische Räume nicht unbedingt gilt. Wenn der Raum, in dem die Mannigfaltigkeiten leben, seinerseits eine siebendimensionale Sphäre ist, unterscheidet die glatte Topologie 28 verschiedene Strukturen, die unter der stetigen Topologie äquivalent sind. Aber niemand hatte geglaubt, dass unter den euklidischen Räumen ausgerechnet der vierdimensionale eine Ausnahme bilden könnte. Als Donaldson bewies, dass im vierdimensionalen Raum unendlich viele glatte Strukturen existieren, staunte die gesamte mathematische Fachwelt.

Sein Resultat wurde umgehend in der Teilchenphysik angewandt, insbesondere auf die »Instantonen«. Das sind Anregungszustände des Vakuums, die auf die globale Gestalt des Raums zurückzuführen sind; einer Theorie zufolge gingen die Instantonen der Entstehung des Universums voraus. Heute bauen zahlreiche Teilgebiete der Quantenfeldtheorie auf Ideen auf, die sich aus Donaldsons Entdeckung ergaben; das gilt insbesondere für die Stringtheorie, die gegenwärtig als der aussichtsreichste Kandidat für eine allumfassende »theory of everything« gilt.

Die Zähmung der Monster

In den letzten 25 Jahren sind drei neuartige mathematische Theorien entstanden. Sie sind mit den Stichwörtern »Fraktale«, »Chaos« und »Komplexität« zu beschreiben.

Jede gute mathematische Theorie hat zwei Eltern: die Vorliebe des Mathematikers für Strukturen und das Interesse des Anwenders aus den Naturwissenschaften. Paradebeispiel ist die Infinitesimalrechnung, die der »Strukturmathematiker« und Philosoph Gottfried Wilhelm Leibniz und der »Anwender« Isaac Newton unabhängig voneinander entwickelten.

Im Falle der Fraktale waren die Strukturen, welche die Aufmerksamkeit der Mathematiker erregten, unter anderem etliche »mathematische Monster«, die im 19. Jahrhundert entdeckt worden waren: Kurven ohne Tangenten, raumfüllende Kurven, Kurven, die sich selbst in jedem ihrer Punkte schneiden (Spektrum der Wissenschaft 9/1992, S. 72). Benoît Mandelbrot zeigte ab Mitte der 1970er Jahre die Bedeutung der »Fraktale« (seine Wortprägung) als Modelle für komplexe Körper der Natur wie Wolken oder Gebirge. Heute trägt die Theorie der Fraktale erheblich zum Fortschritt der gesamten Mathematik bei; sie ist zu einem nützlichen Werkzeug in den theoretischen und experimentellen Naturwissenschaften geworden.

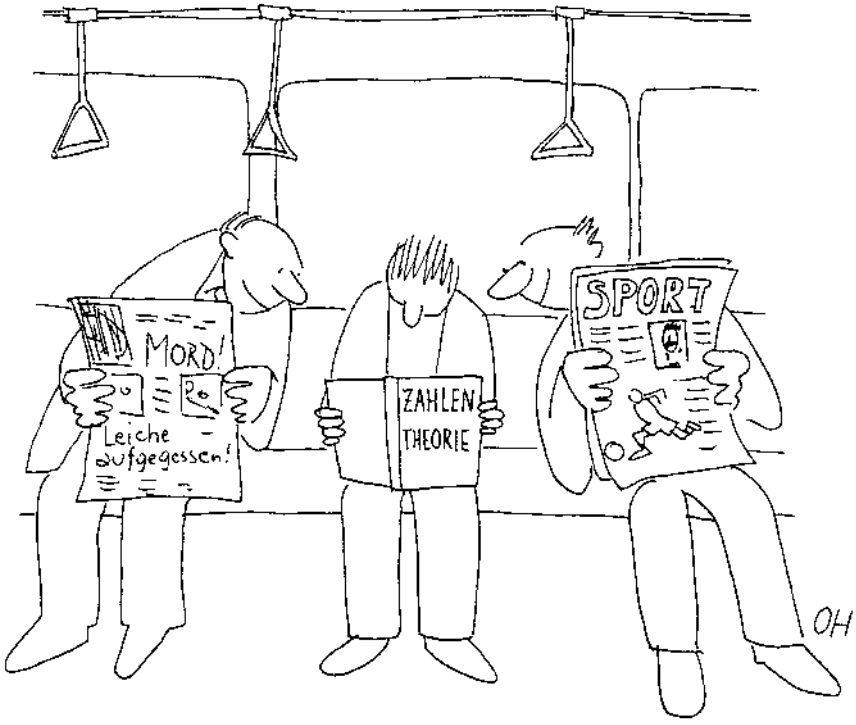
Die Chaostheorie trägt folgender Erkenntnis Rechnung: Selbst einfache und deterministische Gleichungen, die häufig für die Modellierung der physikalischen Welt verwendet werden, können komplizierte Lösungen haben, welche der Determiniertheit zum Trotz alle Merkmale des Zufalls zeigen. Und dieses »regellose«, »chaotische« Verhalten ist eher die Regel als die Ausnahme. So kann sich beispielsweise eine Tierpopulation auch ohne äußere Einflüsse sehr merkwürdig entwickeln – selbst dann, wenn diese Entwicklung einer einfachen Gesetzmäßigkeit gehorcht.

Vom innermathematischen Standpunkt aus ist die Chaostheorie Teil der umfassenderen Theorie der nichtlinearen dynamischen Systeme, welche die Entwicklung verschiedenartigster mathematischer Objekte in der Zeit beschreibt. Anwendungen findet sie inzwischen in allen Gebieten der Naturwissenschaft, von der Astronomie bis zur Zoologie. Insbesondere hat die Chaostheorie gezeigt, dass sich die Natur nur begrenzt voraussagen lässt, und nötigt damit die Physiker, ihre Fragen an die Natur umzuformulieren.

Die Komplexitätstheorie behandelt Systeme aus vielen Komponenten, die miteinander in Wechselwirkung treten, wie beispielsweise eine Menschenmenge oder ein Ameisenstaat. Aus dem Zusammenspiel der einzelnen – sehr einfachen – Interaktionen ergeben sich spektakuläre Ereignisse wie ein Börsenkrach oder eine Heuschreckenplage: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Komplexitätstheorie ist gewissermaßen das Gegenteil von Chaostheorie: Sie betrachtet wohldefinierte und – in gewissen Grenzen – vorhersagbare Ereignisse als Folge sehr vieler kleiner chaotischer Einzelaktionen. Hervorgegangen ist sie aus der Kombination von Ideen der Simulationstheorie und der Modelltheorie sowie aus Methoden der Datenanalyse. Jedoch ist es noch nicht gelungen, ihre mathematischen Kernideen in Gestalt von logisch streng bewiesenen Sätzen und Methoden zu organisieren. Die Komplexitätstheorie hält große Überraschungen für uns bereit; es bleibt aber noch viel Arbeit zu leisten, bis sie ihren Platz im Werkzeugkoffer der Mathematik gefunden hat.

Licht und Schatten

Es sei nicht verschwiegen, dass es am Anfang des 21. Jahrhunderts auch Enttäuschungen gibt. Zwei der wichtigsten Probleme, die Riemann'sche und die Poincaré'sche Vermutung, sind immer noch ungelöst. Die Riemann'sche Vermutung ist eine Aussage über die Nullstellen einer komplexen Funktion, welche aufs Engste mit Primzahlen zusammenhängt; die Poincaré-Vermutung besagt, dass die einzige



Mannigfaltigkeit, in der jeder geschlossene Weg auf einen Punkt zusammengezogen werden kann, die 3-Sphäre ist, also das dreidimensionale Analogon zur gewöhnlichen Kugeloberfläche. In beiden Fällen wurden Lösungen angekündigt, die jedoch von ihren Autoren wegen subtiler Fehler in der Beweisführung zurückgezogen werden mussten. Eine Lösung dieser Probleme würde viele Teilgebiete der Mathematik voranbringen.

Insgesamt aber hat die Bedeutung der Mathematik explosionsartig zugenommen. Waren ihre Anwendungen einst auf die Physik und die Ingenieurwissenschaften beschränkt, so ist sie heute in alle Bereiche menschlicher Aktivität vorgedrungen: Kommunikation, Wirtschaft, Politik … Insbesondere die Biologie stellt faszinierende mathematische Fragen: Wie entwickeln sich die Arten? Wie falten sich Aminosäureketten zu Proteinen zusammen? Ich vermute, dass die Biologie im 21. Jahrhundert mit die bedeutendste Quelle mathematischer Begriffsbildung sein wird.

Vor 25 Jahren war die Mathematik eine quasi-esoterische Wissenschaft: hoch geschätzt von den Eingeweihten, aber weitgehend unverstanden außerhalb dieses geschlossenen Zirkels. Heute haben die Naturwissenschaften und die Allgemeinheit ein klareres und vor allem positiveres Bild von der Mathematik. Den Leuten wird bewusst, dass sie sich erneuert, dass sie weit mehr ist als das, was man in der Schule lernt, und dass alle Bereiche menschlicher Aktivität Nutzen aus ihr ziehen. Diese Vielfalt der Anwendungen, der Inspirationen und der Methoden haben die Mathematik zu dem gemacht, was sie heute ist: eines der mächtigsten Produkte des Denkens, welche die Menschheit je hervorgebracht hat. ◁

Ian Stewart ist Professor der Mathematik an der Universität von Warwick in Coventry (England).

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Alles Mathematik. Von Martin Aigner und Ehrhard Behrens (Hg.). Vieweg, Braunschweig. 2., erweiterte Auflage 2002.

Mathematics Unlimited – 2001 and Beyond. Von Björn Engquist und Wilfried Schmidt (Hg.). Springer, Berlin 2001.

Mathematics: Frontiers and Perspectives. Von Vladimir Arnold et al. (Hg.). American Mathematical Society, Providence (RI) 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Menschwerdung durch Kraftnahrung

Lange behaupteten Ernährungsforscher, Zivilisationskrankheiten würden deshalb überhand nehmen, weil wir uns anders ernähren als die Jäger und Sammler der Altsteinzeit. Jetzt wird klar, dass die Lage komplexer ist.

Von William R. Leonard

Der Mensch ist ein sonderbarer Affe. Er geht auf zwei Beinen und trägt dabei schwer an seinem großen Gehirn. Doch mit dieser Ausrüstung hat er jeden Winkel der Erde erobert. Wieso sich die Menschenlinie von der Primatennorm so grundlegend abhebt, möchten Anthropologen seit langem verstehen. Die verschiedensten Deutungsvorschläge kamen auf. Doch zunehmend schält sich ein Faktor als wegweisend heraus, der während der menschlichen Evolution wohl stets beträchtlichen Einfluss nahm: die Nahrung.

In Abwandlung eines gängigen Spruchs darf man sagen: Der Mensch ist, was er einst aß. In unserer Vorzeit wirkte die natürliche Selektion offenbar dahin, dass unsere Vorfahren sich mit immer weniger Aufwand immer hochwertigere, energiehaltigere Nahrung beschafften. Der Hintergrund dürfte gewesen sein, dass sich für unsere Vorfahren während ihrer Evolution das Angebot an Essbarem fortwährend wandelte.

Darum unterscheiden wir uns auch hinsichtlich unseres Essens von allen anderen Primaten. Im Vergleich zu den Menschenaffen ist unsere Kost wesentlich gehaltvoller an Energie liefernden Nährstoffen – an Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten. Das gilt für menschliche Kulturen mit ganz unterschiedlichen Ernährungsgewohnheiten – für Bevölkerungen, die fast rein von Pflanzenkost leben, ähnlich wie für solche mit überwiegendem Fleischkonsum. Wann schlugen unsere Vorfahren diesen Sonderweg ein? Und vor allem, wie kam es dazu? Um entscheiden zu können, ob wir uns heute richtig ernähren, interessiert auch, wie sehr unser Speiseplan von dem der Menschen früherer Zeiten abweicht.

Diese Frage beschäftigt Ernährungsforscher verstärkt seit Mitte der 1980er Jahre. 1985 erschien in der Wissenschaftszeitschrift »New England Journal of Medicine« ein Artikel über Ernährung in der Altsteinzeit, der Furore machte. Die Autoren, die Anthropologen S. Boyd Eaton und Melvin J. Konner von der Emory-Universität in Atlanta (Georgia), behaupteten, Zivilisationskrankheiten wie Fettsucht, Bluthochdruck, Arteriosklerose oder Altersdiabetes würden deswegen überhand nehmen, weil die Menschen heutzutage nicht mehr das Gleiche essen wie die Jäger und Sammler des Paläolithikums. An solche Kost seien sie durch ihre Evolution aber eigentlich angepasst.

Inzwischen sehen Wissenschaftler dies allerdings differenzierter. Hierzu trugen Studien bei, in denen die Ernährung von Menschen traditioneller Kulturen

JOHN GURCHE

So könnte es angefangen haben: Dem kleinhirnigen *Australopithecus afarensis* genügte vor dreieinhalb Millionen Jahren noch pflanzliche Kost als Hauptnahrung – wie dieser Gruppe, die einen lichten Wald durchstreift.

mit der von tierischen Primaten verglichen wurde. Ihnen zufolge können wir bei recht unterschiedlichen Speisezetteln gesund leben. In seiner Evolution hat sich der Mensch keineswegs fest darauf eingestellt, sich genau so ernähren zu müssen wie in der Altsteinzeit.

Betrachten wir die energetische Seite dieser Evolution aus Sicht des Einzelnen. Es kommt darauf an, wie viel Energie für Ernährungszwecke – für Nahrungssuche und Nahrungsaufnahme – aufgewendet werden muss und wie viel in der Bilanz gewonnen wird, einerseits um sich am Leben zu erhalten und gesund zu bleiben, andererseits für Wachstum und Nachwuchs. Gerade bei Säugetiermüttern ist der Aufwand für Schwangerschaft und Milchproduktion beträchtlich.

Die Größe dieser Posten hängt auch von der Umwelt ab. So benötigt der Organismus in kälterem Klima mehr Stoffwechselenergie. Doch auch unter harschen Bedingungen sollte möglichst einiges an Überschuss bleiben, der der Fortpflanzung und Nachkommenschaft zugute kommt. Bei Tieren spiegelt sich evolutionärer Wandel oft darin, wie sie sich Nahrungsenergie verschaffen und diese dann verwenden. In der menschlichen Evolution war das nicht anders.

Aufrecht gehen hilft Energie sparen

Die typischen Merkmale des Menschen entstanden nacheinander. Zuerst trat der aufrechte Gang auf. Viel später begann das Gehirn größer zu werden. Und da erst eroberte der Mensch andere Kontinente.

Warum geht der Mensch aufrecht? Die heute lebenden Affen, auch die Menschenaffen, laufen auf dem Boden gewöhnlich auf allen vieren. Deswegen ist anzunehmen, dass sich auch der letzte gemeinsame Vorfahre von Mensch und Schimpanse auf dem Boden vierfüßig fortbewegte. Wann genau dieser Primat lebte, ist nicht bekannt. Afrikanische Vormenschen, die Australopithecinen, gingen anscheinend vor ungefähr vier Millionen Jahren schon aufrecht.

In der Paläontologie kursieren zahlreiche Erklärungen für die Entstehung des aufrechten Gangs. So meinte C. Owen Lovejoy von der Kent State University (Ohio) schon 1981, der Hintergrund sei gewesen, dass die Arme zum Tragen von Kindern und Nahrung frei wurden. Etwas jünger ist die These von Kevin D. Hunt von der Indiana University in Bloomington, die aufrechte Haltung habe zunächst dem Nahrungsammeln gedient, denn die Primaten ▷

konnten nun vom Boden aus zu Pflanzen hinaufreichen. Peter Wheeler von der Liverpool John Moores University (England) wiederum vermutet, dass der aufrechte Gang dazu verhalf, der sengenden afrikanischen Sonne weniger Körperoberfläche auszusetzen und so die Hitze besser auszuhalten.

Die Liste an Thesen ließe sich fortsetzen. Doch wahrscheinlich entstand der aufrechte Gang nicht allein aus einem einzigen Grund. Vielmehr dürften sich bei seiner Evolution vielerlei Vorteile ausgewirkt haben. Auf eine mögliche Ursache stießen meine Frau Marcia L. Robertson und ich, als wir die energetischen Kosten von zweibeiniger und vierbeiniger Fortbewegung ermittelten. Wir verglichen den Energieaufwand bei verschieden großen Tieren. Dabei kam heraus, dass das Gewicht und die Geschwindigkeit die Fortbewegungskosten allgemein am besten anzeigen. Erstaunlicherweise ist zweibeiniges Gehen für einen Primaten unseres Gewichts bei Gehgeschwindigkeit ökonomischer als Vierbeinigkeit.

Die Art, wie sich Menschenaffen auf dem Boden vorwärts bewegen, ist dagegen ausgesprochen unökonomisch. Schimpansen, die auf den Fingerknöcheln laufen, verbrauchen dabei 35 Prozent mehr Energie als ein typisches vierbeinig laufendes bodenlebendes Säugetier gleicher Größe, etwa ein großer Hund. Wahrscheinlich fällt bei den Menschenaffen eine solche Energieverschwendung nicht sehr ins Gewicht, zumal sie vorzüglich klettern und hangeln können. Wie schon ihre Vorfahren bewohnen sie dichte Wälder, die ihnen auf wenig Raum vergleichsweise viel Nahrung bieten. Nur selten sind sie gezwungen, eine längere Strecke auf dem Boden zurückzulegen. Über den Tag verteilt mögen das zur Nahrungssuche höchstens ein oder zwei Kilometer sein. Manche Menschenaffen, wie Orang-Utans, überbrücken größere Distanzen möglichst im Geäst.

Für die Menschenaffen hätte es sich energetisch wenig gelohnt, eine effektivere Art der Fortbewegung am Boden zu entwickeln. Bei den Vorfahren der ersten aufrechten Hominiden trieb offenbar ein Klimawandel die Revolution im Körperbau an, der sich auch später in der menschlichen Evolution noch verstärkte. Der Selektionsdruck auf eine effektive Fortbewegungsart dürfte generell immer dann besonders groß sein, wenn Lebewesen weit umherstreifen müssen. Im Pliozän, das vor rund 5 bis 1,8 Millionen Jahren lag, wurden weite Gebiete Afrikas immer trockener. Die Wälder gingen zurück, und an ihrer Stelle breiteten sich Savannen mit lichtem Baumbestand und zunehmend Grasflächen aus. Die Nahrung war in diesem Lebensraum weitflächiger verteilt. Um satt zu werden, mussten die frühen Hominiden größere Strecken am Boden zurücklegen.

Da zahlte sich eine kostengünstige Gehweise aus. Die Zweibeinigkeit gehörte in der Evolution der menschlichen Ernährung wohl zu den ersten Strategien, auf die veränderten Umweltbedingungen zu reagieren. Die Energie, welche diese Primaten dadurch sparten, konnten sie anderweitig verwenden, vor allem auch für Nachwuchs. Das beste heute verfügbare Modell für ihre Lebensweise in dieser Hinsicht bieten neuzeitliche Jäger und Sammler. Sie wandern oft zehn Kilometer am Tag oder mehr, nur um genügend zu Essen zu finden.

IN KÜRZE

- In der menschlichen Evolution wurden energetisch konzentrierte Nahrung und **Effizienz der Nahrungsbeschaffung** zunehmend wichtig. Beides ermöglichte die **Vergrößerung des Gehirns** – was wiederum die Nahrungsqualität noch mehr erhöhte.
- Heutige traditionelle Kulturen ernähren sich extrem verschieden. Ursache von **Zivilisationskrankheiten** ist nicht, wie oft verlautet, eine gewissermaßen unnatürliche Kost. Vielmehr stehen Energiezufuhr und -verbrauch nicht im Einklang.

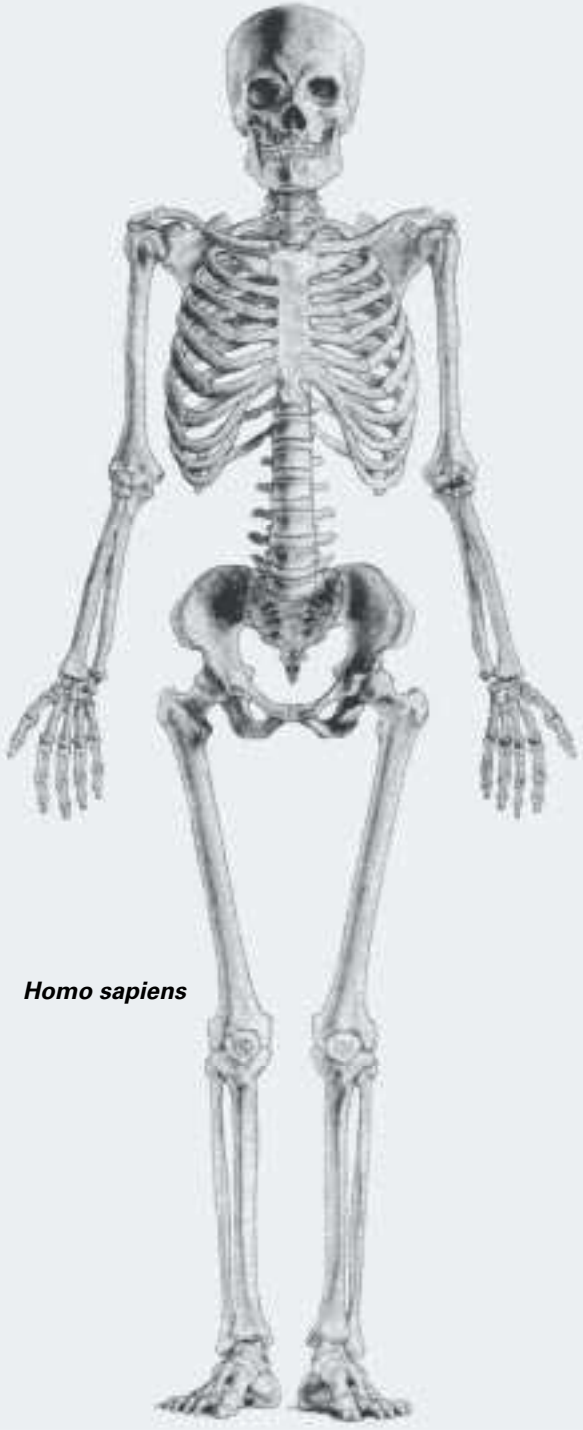
Großes Gehirn – energetischer Luxus

Kaum hatten die Hominiden den aufrechten Gang perfektioniert, begann das Gehirn an Größe zuzunehmen. Zunächst geschah dies kaum merklich. Die Australopithecinen besaßen wohl zu keiner Zeit beträchtlich größere Gehirne als die heutigen Menschenaffen. Schimpansengehirne messen, um grob zu vergleichen, im Durchschnitt knapp 400 Kubikzentimeter. Auch die frühen Australopithecinen hatten vor vier Millionen Jahren erst Hirnvolumina von um die 400 Kubikzentimeter. Dies steigerte sich bis vor zwei Millionen Jahren langsam auf rund 500 Kubikzentimeter. Erst mit der menschlichen Gattung *Homo*, die vor mehr als zwei Millionen Jahren erschien und noch eine Zeit lang neben den letzten Australopithecinen lebte, begann die rasante Größenzunahme. Das Gehirn von *Homo habilis* vor zwei Millionen Jahren maß bereits 600 Kubikzentimeter, das des frühen *Homo erectus* nur 300 000 Jahre später schon 900 Kubikzentimeter (siehe Bild auf Seite 34 oben).

Das größere Gehirn machte eine beträchtliche Ernährungsumstellung notwendig, denn es brauchte insgesamt viel mehr Energie. Pro Gewichtseinheit setzt Hirnmasse 16-mal so viel Energie um wie Muskelgewebe. Der Körper des Menschen verbrennt im Ruhezustand nicht mehr Energie als der anderer gleich schwerer Säugetiere. Trotzdem ist unser Ruhestoffwechsel höher, weil unser Gehirn einen größeren Anteil der Nahrungsenergie verwertet. Bei Affen sind es acht bis zehn Prozent des Ruheumsatzes, beim Menschen zwischen 20 und 25 Prozent. Bei anderen Säugetieren entfallen im Ruhezustand auf den Gehirnstoffwechsel nur drei bis fünf Prozent der verbrauchten Energie.

Welchen Anteil des Ruheumsatzes forderten die Gehirne früher Hominiden? Um dies zu berechnen, verwendeten meine Frau und ich die Schätzungen von Henry M. McHenry von der Universität von Kalifornien in Davis zu deren Körpergröße. Demnach dürfte ein typischer, unter vierzig Kilogramm schwerer Australopithecine für sein 450 Kubikzenti- ▷

Der erste Schritt zum Menschen

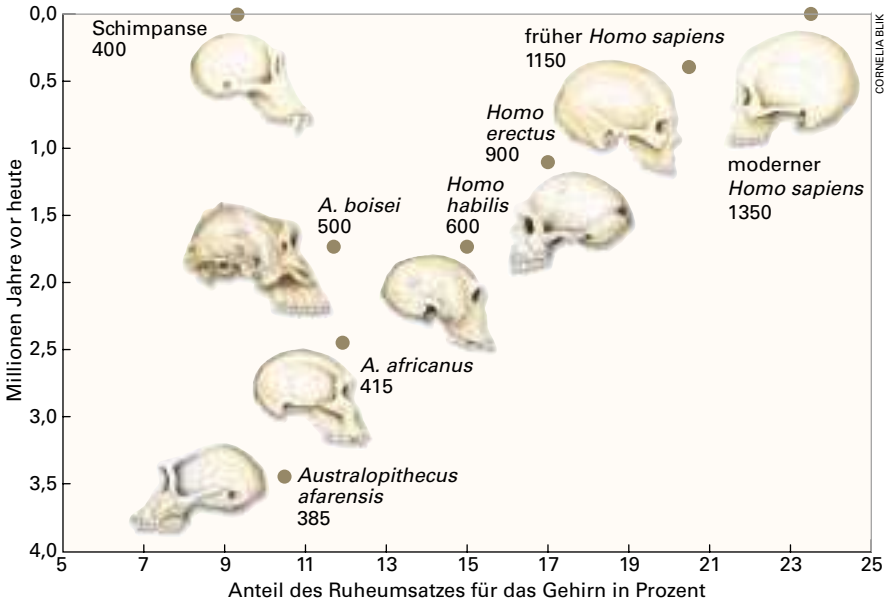


Homo sapiens

Schon die Australopitecinen gingen vor vier Millionen Jahren zweifelsfrei aufrecht. Das bezeugt unter anderem die Anatomie von Becken, Kniegelenk und Fuß. Sie besaßen trotzdem noch relativ kurze Beine und lange Arme. Diese Vormenschen konnten zwar den großen Zeh nicht mehr opponieren, damit beim Klettern also nicht mehr zugreifen, doch die Zehen waren noch gekrümmt. Auch andere Unterschiede lassen annehmen, dass sie vermutlich nicht ganz genauso gingen wie wir und sich auch noch regelmäßig in Bäumen aufhielten.

Australopithecus afarensis

JOHN GURCHE



Mit zunehmender Größe des Gehirns stieg auch der Energiebedarf der Hominiden (Punkte). Das Schema mit groben Größen- und Zeitangaben gibt wider, welchen Anteil das Gehirn am gesamten Energiestoffwechsel des Organismus etwa hat/hatte (die Zahlen stehen für Kubikzentimeter Gehirnvolumen).

▷ meter großes Gehirn elf Prozent des Ruheumsatzes aufgewendet haben. *Homo erectus*, der bereits an die sechzig Kilogramm wog, brauchte für sein doppelt so großes Gehirn schon 17 Prozent.

Wie konnte ein so kostspieliges Organ entstehen? Dean Falk von der Florida State University in Tallahassee vertritt die These, dass der aufrechte Gang eine bessere Kühlung des Gehirns durch den Blutfluss ermöglichte. Vorher habe das besonders hitzeempfindliche Gehirn nicht größer werden können. Es gibt auch andere Erklärungsversuche – doch wiederum dürften vielerlei Faktoren mitgewirkt haben. Meines Erachtens konnte das Gehirn jedoch fast mit Sicherheit nicht zunehmen, bevor eine energetisch gehaltvollere Ernährung seine Versorgung gewährleistete.

Ein Zusammenhang zwischen Gehirngröße und Nährstoffversorgung besteht schon bei anderen Primaten (siehe SdW 10/1993, S. 68). Arten mit vergleichsweise größeren Gehirnen fressen reichhaltigere Kost. Im Grunde stellt der Mensch nur das Extrem des Spektrums dar. Viel Energie, auf die Menge bezogen, liefern – und lieferten vor allem damals – tierische Nahrungsmittel. Auch Früchte enthalten mehr verwertbare Energie als Blätter oder Gras. So ergeben

Die Küche des frühen Menschen

Heizte Kochen die Evolution zum Jäger an?

Nicht nur tierische Nahrung eignet sich, um energiereich zu essen. Richard Wrangham von der Harvard Universität in Cambridge (Massachusetts) und seine Kollegen vermuten, dass die Hominiden zunächst ihren zunehmenden Energiebedarf deckten, indem sie stärkehaltige Pflanzenteile, hauptsächlich Knollen, erhitzten. Kochen macht pflanzliche Nahrung einerseits weicher und so leichter kaubar. Es schließt vor allem aber manche komplexen Kohlenhydrate (wie Stärke) auf, die sich dann viel besser verdauen lassen und somit im Ganzen mehr Energie liefern.

Nach Wrangham könnte *Homo erectus* bereits vor 1,8 Millionen Jahren das Kochen erfunden haben. Nach seiner Ansicht wurden dadurch die Backenzähne kleiner und das Gehirn größer. Erst die zusätzlichen Kalorien erlaubten dem Menschen, mehr als vorher Tiere zu jagen, ein Energie zehrendes Unterfangen.

Energetisch erschiene dieses Szenario einleuchtend. Allerdings ist fraglich, ob der Mensch das Feuer schon so früh beherrschte. Wrangham und sein Team nennen Koobi Fora und Chesowanja. Die beiden ostafrikanischen Fundstätten sind 1,6 beziehungsweise 1,4 Millionen Jahre alt und weisen Feuerspuren auf. Doch ob Menschen diese Feuer entfachten und unterhielten, ist umstritten. In Europa zumindest gelang das wohl erst sehr viel später. Hier sind die ältesten eindeutigen Anzeichen für den kontrollierten Gebrauch von Feuer 200000 Jahre alte Steinherde und verkohlte Tierknochen.

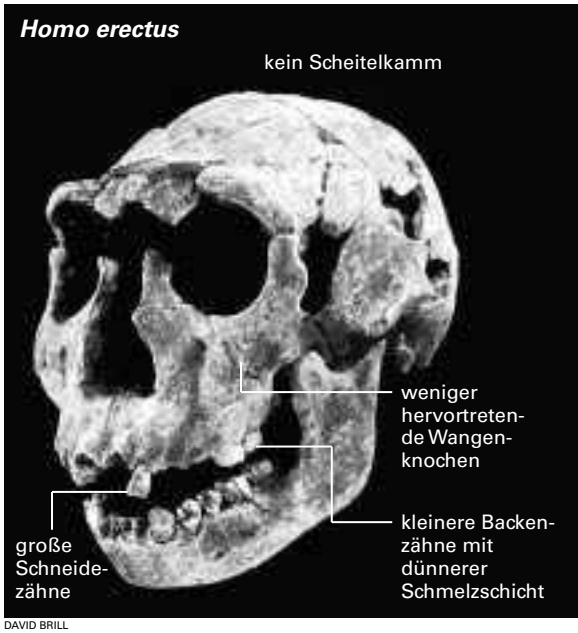
Dass die Kunst zu Kochen die menschliche Ernährung wesentlich verbesserte, steht fest. Die Frage ist nur, wie alt diese Fertigkeit ist.

Viele Wildpflanzen liefern reichlich Nahrungsenergie – wenn man diese zu gewinnen weiß.

DAVID BRILL

Die so genannten robusten Australopithecinen (links) besaßen eine ausgeprägte Kaumuskulatur und breite, harte Backenzähne zum Zerkleinern zäher Pflanzennahrung.

Schon der frühe *Homo* (rechts) ernährte sich von weicherer Nahrung mit hohem Energiegehalt. Dazu gehörte sicherlich regelmäßig Fleisch.



DAVID BRILL

hundert Gramm mageres Fleisch mindestens 800 Kilojoule (ungefähr 200 Kilokalorien). Hundert Gramm Früchte bringen nur 200 bis 400 Kilojoule ein, die gleiche Portion Blätter lediglich vierzig bis achtzig Kilojoule.

Das eher zierliche Gebiss von *Homo habilis*

Nach neuen Untersuchungen von Loren Cordain von der Colorado State University in Fort Collins beziehen heutige Jäger-und-Sammler-Völker durchschnittlich vierzig bis sechzig Prozent ihrer Nahrungsenergie aus Fleisch und anderen tierischen Produkten. Schimpansen dagegen fressen zwar auch gern erbeutete kleinere Säugetiere sowie Insekten. Immerhin gewinnen sie auf diese Weise fünf bis sieben Prozent ihrer Nahrungsenergie. Dass sich die Vertreter von *Homo* mit zunehmender Größe ihres Gehirns auch zunehmend Nahrung mit hohem Energiegehalt suchten, ist anzunehmen.

Ihr wachsender Fleischverzehr lässt sich auch durch den Vergleich von anatomischen Merkmalen der verschiedenen Vor- und Frühmenschen ermessen (siehe Bilder oben). Die Australopithecinen – auch wenn sie sicherlich hin und wieder gern Fleisch fraßen – besaßen allesamt noch Schädel, Kiefer und Zähne, die sich sehr gut für zähe, wenig gehaltvolle Pflanzenkost eigneten. Sie hatten eine kräftige Kaumuskulatur und breite Backenzähne. Besonders ausgeprägt war dieses Wesensmerkmal bei den so genannten robusten Arten, die noch zu Zeiten von *Homo habilis* lebten. Ihrem Aussehen nach konnten die Hominiden mit ihrem Gebiss faserreiche Pflanzen gut zermahlen. Dagegen waren die frühen Angehörigen der Gattung *Homo*, Nachfahren von so genannten grazilen Australopithecinen, zwar um einiges größer als ihre Vorfahren, trugen aber viel kleinere Gesichter und zierlichere Kiefer, hatten weniger Kaumuskulatur und schwächere Backenzähne.

Offenbar bot wiederum der Klimawandel den Rahmen für die Veränderungen. Hatten sich die ersten Hominiden noch überwiegend von relativ gut zerkaubaren Pflanzenteilen ernähren können, wenn sie nur ausgiebig genug umhersuchten, so schränkte die fortschreitende Austrocknung nun das Angebot an leicht essbarer vegetarischer Kost stark ein. Die Hominiden reagierten darauf in zwei unterschiedlichen Weisen. Zum einen entstanden die robusten Australopithecinen. Diese Arten entwickelten anatomische Anpassungen, dank derer sie von der verfügbaren harten, schwer kaubaren Pflanzenkost leben konnten.

Die Gattung *Homo* schlug einen völlig anderen Weg ein. Sie begann das Fleischangebot der Savannen zu nutzen. Die Graslandschaften, die jetzt aufkamen, ernährten zahlreiche Weidegänger wie Antilopen und Gazellen. Mit *Homo erectus* entstand erstmals eine Jäger-und-Sammler-Gesellschaft, die sich zu einem nicht unerheblichem Maße von erlegtem Wild ernährte und die zusammengetragene Nahrung unter den Mitgliedern der Gemeinschaft aufteilte. Archäologische Funde weisen auf die Revolution im Verhalten hin. Bei den Lagerstätten der Frühmenschen mehren sich nun Tierknochen, die erkennen lassen, dass man die Tiere mit Steinwerkzeugen zerlegte.

Zu reinen Fleischessern wurden diese Menschen deswegen nicht. Aber schon indem sie ihren Speisezettel um nennenswerte Mengen tierischer Nahrung ergänzten, werteten sie ihre Versorgung auf. Hinzu kam das Teilen des vorhandenen Essens untereinander, ein für Jäger und Sammler typisches Verhalten. Beides verhalf dazu, dass die Ernährung besser und zuverlässiger wurde.

Warum Afrika zu eng wurde

Sicherlich erklärt sich die Zunahme der Gehirngröße nicht allein durch die reichere, konzentriertere Nahrung. Doch es erscheint plausibel, dass die Ernährung in dieser Evolution eine entscheidende Rolle spielte. Nachdem die Größenzunahme erst einmal eingesetzt hatte, trat wahrscheinlich ein synergistischer Effekt ein: Wachsende Nahrungsqualität und Gehirnzunahme bedingten gegenseitig eine weitere Steigerung. Größere Gehirne befähigten zu komplexerem sozialen Verhalten, was wiederum die Taktiken der Nahrungsbeschaffung verbesserte; und indem die Ernährungslage immer günstiger wurde, konnte auch das Gehirn noch größer werden.

Gleich zu Beginn seines Auftretens setzte *Homo erectus* gewissermaßen auch den dritten Meilenstein in der menschlichen Evolution. Er entstand vor rund 1,8 Millionen Jahren in Afrika, doch einige seiner Artgenossen verließen schon ▷

Ernährungsgewohnheiten und Gesundheitsfolgen

Ein hoher Fleischkonsum bedeutet nicht grundsätzlich ein Gesundheitsrisiko – genauso wenig wie eine relativ einseitige Ernährung. Allerdings müssen Lebensweise und Energiezufuhr zusammenpassen. (Die Energiewerte beziehen sich auf den Durchschnitt beider Geschlechter, die Cholesterinwerte wie auch die Angaben zum BMI – »Body Mass Index«, dem Gewicht bezogen auf die Körpergröße – auf den von Männern. Ein BMI über 25 bedeutet Übergewicht.)

Kulturform	tägliche Gesamtenergiezufuhr in Joule (bzw. Kilokalorien)	Prozent der Energie aus Tierprodukten	Prozent der Energie aus Pflanzenprodukten	Gesamtcholesterin-spiegel	BMI
Jäger-Sammler					
!Kung (Botswana)	8800 (2100)	33	67	121	19
Inuit (Nordamerika)	9850 (2350)	96	4	141	24
Hirten, Viehhalter					
Turkana (Kenia)	5900 (1400)	80	20	186	18
Evenki (Sibirien)	11 850 (2820)	41	59	142	22
Ackerbauern					
Quechua (Peru, Hochland)	8400 (2000)	5	95	150	21
Industriegesellschaft					
USA	9450 (2250)	23	77	204	26

▷ bald diesen Kontinent. Lange hatten Anthropologen angenommen, dass dieser frühe *Homo* zunächst einige hunderttausend Jahre auf seinem Heimatkontinent blieb, bevor er sich in andere Gefilde der Welt wagte und sich dort gemächlich ausbreitete. Nach älteren Auffassungen erlaubten erst vor etwa 1,4 Millionen Jahren die verbesserten Werkzeugtechnologien der Acheuléen-Industrie, vor allem die Erfindung des Faustkeils, solche Unternehmungen.

Doch nach heutiger Kenntnis scheint sich *Homo erectus*, kaum hatte er die Bühne betreten, sogleich auf den Weg gemacht zu haben. Die ältesten Fossilien dieser Menschen außerhalb Afrikas stammen vom Südrand des Kaukasus und aus Indonesien. Sie sind zwischen 1,7 und 1,8 Millionen Jahre alt. Offenbar war *Homo erectus* sozusagen der geborene Wanderer.

Und auch für diese Neuerung scheint die Nahrung die Antriebskraft gewesen zu sein. Die Größe des Streifgebiets oder Territoriums eines Säugetiers bestimmt sich weitgehend durch das, was es frisst. Raubtiere beanspruchen meist viel größere Reviere als gleich große Pflanzenfresser, weil ihnen dieselbe Fläche weniger Nahrungsenergie bietet. Wahrscheinlich benötigte *Homo erectus* nicht nur wegen des gestiegenen Fleischbedarfs, sondern auch wegen seiner viel höheren Körpergröße wesentlich mehr Raum als die kleinen Australopitecinen, die überwiegend von Pflanzenkost lebten.

Schon bei einem gering höheren Fleischverzehr hätte *Homo erectus* schätzungsweise acht- bis zehnmal so große Gebiete beansprucht wie die Australopithecinen. Das errechneten Susan C. Antón von der Rutgers Universität, meine Frau und ich anhand von Daten für heutige Affen und Jäger-Sammler-Völker. Wurde Afrika dem frühen Menschen plötzlich zu eng? Ob allein dieser Anschub durch den Ernährungszwang die Menschen schließlich bis in fernste Gefilde getragen hätte, ist ungewiss. Vielleicht ließen die Auswanderer sich außerdem von wandernden Tierherden bis in entlegene Winkel der anderen Kontinente locken.

Vielfältige Ernährung bei Wildbeutern und Viehhaltern

In Eurasien stieß der Mensch schließlich auch weiter in den Norden vor – und wurde hinsichtlich Ernährung neuerlich herausgefordert. Zu den ersten Bewohnern arktischer Lebensräume gehörten die Neandertaler. Sie entstanden im eiszeitlichen Europa, und es ist so gut wie sicher, dass ihr Energiebedarf in dieser Umwelt besonders hoch war.

Welche Mengen an Nahrungsenergie die Neandertaler benötigt haben mögen, lassen heutige Völker arktischer Breiten erahnen, die noch in traditioneller Weise leben. Nehmen wir die Evenki, sibirische Rentierhalter, die ich zusammen mit Peter Katzmarzyk von der Queens Universität in Ontario (Kanada) und Victoria A. Galloway von der Universität Toronto (beides Kanada) untersuchte. Schon der Ruhestoffwechsel dieser Menschen ist um rund 15 Prozent höher als der gleich großer Personen, die in gemäßigtem Klima leben. Gleiches gilt für die Inuit Nordkanadas. Das anstrengende Alltagsleben, das diese Völker auf sich nehmen, macht den Unterschied im Energiebedarf noch größer.

Ein gut siebzig Kilogramm wiegender typischer Städter der USA verbraucht täglich knapp 11 000 Kilojoule (2600 Kilokalorien). Ein Evenki, der kleiner ist und nur 55 Kilogramm wiegt, benötigt 12 600 Kilojoule (3000 Kilokalorien). Nach Berechnungen von Mark Sorensen von der Northwestern University in Evanston (Illinois) und mir müssten die schwer gebauten, massiven Neandertaler am Tag fast 17 000 Kilojoule (4000 Kilokalorien) umgesetzt haben. Dass sie es verstanden, sich mit solchen Mengen an energiereicher Nahrung zu versorgen, spricht für ihre Fertigkeit als Jäger.

Sich gehaltvolle Mahlzeiten zu beschaffen, gelang dem Menschen im Verlauf seiner Geschichte immer besser. Er erfand das Kochen, die Landwirtschaft und schließlich die moderne Fertignahrung. Der Erfolg dieser Errungenschaf-

ten spiegelt sich seit Jahrtausenden im Bevölkerungswachstum.

Kochen erhöht den Nährwert von Wildpflanzen, weil sich die in ihnen enthaltenen Nährstoffe nun leichter aufschließen lassen (siehe Kasten Seite 34). Seit der Mensch Pflanzen kultiviert, versucht er, ihre Eigenschaften zu seinem Nutzen zu verändern. Er züchtet ertragreichere, besser bekömmliche und nahrhaftere Sorten. Im Grunde macht er die Pflanzenprodukte tierischen Nahrungsmitteln ähnlicher. Dies setzt sich heute in gezielten genetischen Eingriffen fort, wenn etwa Früchte oder Getreide auf diesem Wege mit für den Menschen wichtigen Inhaltsstoffen angereichert werden.

Auch der Trend zu Energiedrinks und Energieriegeln als Ersatz für ganze Mahlzeiten führt eigentlich nur die Entwicklung zu immer konzentrierterer Kraftnahrung weiter, die in grauer Vorzeit begann. Von Anfang an hatte der Mensch das Bestreben, mit geringstmöglichem Aufwand aus einer kleinstmöglichen Nahrungsmenge die größtmögliche Nährstoffausbeute zu gewinnen.

An sich ist diese Strategie offensichtlich sehr erfolgreich. Noch nie gab es so viele Menschen wie heute. Die Bedeutung energiekomprimierter Kost in der menschlichen Evolution spiegelt sich aber wohl am deutlichsten darin, dass weltweit ein Großteil der modernen Gesundheitsprobleme mit dem Nährstoffangebot zusammenhängt. Bei Unter- wie Überernährung weichen die Zustände von der Energiedynamik ab, die unsere Vorfahren einst etablierten.

Neue Fettsucht in der Dritten Welt

Viele Kinder aus ländlichen Gebieten der Dritten Welt erhalten minderwertige Kost. Darum bleiben sie im Wachstum zurück, und auch die dadurch bedingte Kindersterblichkeit ist hoch. Diese Kinder bekommen besonders in der Zeit des Abstillens und danach kein so nährstoffhaltiges, energiereiches Essen, wie sie es gerade in diesem Alter starken Wachstums bräuchten. Als Neugeborene waren sie meist ebenso groß und wogen ebenso viel wie Kinder aus wohlhabenden Ländern. Aber mit drei Jahren sind sie viel kleiner und zarter, vergleichbar den untersten zwei bis drei Prozent der Kinder aus Industrieländern.

Dagegen steigt in unserer Überflussgesellschaft nicht nur der Prozentsatz stark übergewichtiger Erwachsener, sondern auch der fettsüchtiger Kinder schnell an. Unser natürliches Verlangen nach Nahrungsmitteln von hohem Energiegehalt – besonders auch das nach Zucker und Fett – können wir leicht und zudem preiswert stillen. Nach Einschätzung von Ärzten ist in Deutschland jedes zehnte bis zwanzigste Kind zu dick. Von den Erwachsenen sind über die Hälfte der Männer und vierzig Prozent der Frauen übergewichtig, davon etwa jede fünfte Person stark.

Die Kost der Neandertaler

Rekordverdächtiger Fleischkonsum

Um die Ernährungsgewohnheiten früherer Menschen herauszufinden, verwenden Anthropologen heute neben den bewährten anatomischen und archäologischen Verfahren auch chemisch-physikalische Methoden. Sie nutzen dabei die Erkenntnis, dass verschiedenartige Nahrungsmittel die chemischen Elemente jeweils in bestimmter Isotopenzusammensetzung enthalten, Fleisch beispielsweise in einer anderen als Pflanzenkost. Dies spiegelt sich langfristig in den Knochenproteinen.

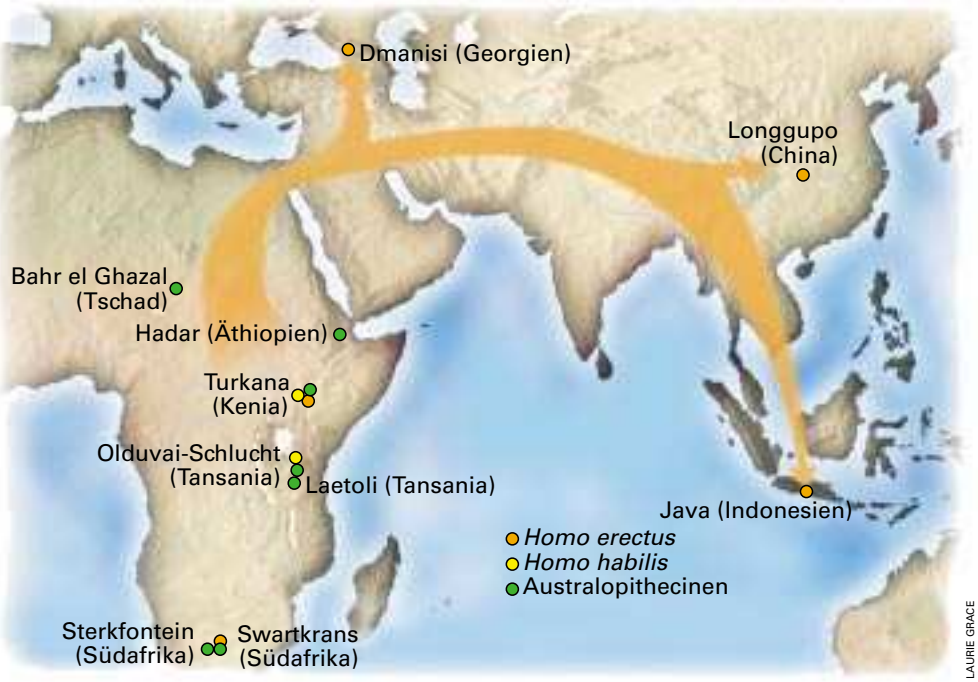
Michael Richards von der Universität Bradford (England) und seine Kollegen maßen kürzlich Isotopenverhältnisse von Kohlenstoff und Stickstoff unter anderem in den 29000 Jahre alten Neandertalerfossilien aus der Vindija-Höhle in Kroatien. Sie bestimmten dazu Werte für das gerüstbildende Kollagen, das in Knochen die Hauptproteinmasse ausmacht.

Dabei kam heraus, dass die Neandertaler als Proteinquelle fast nur Fleisch verzehrt haben müssen. Das Kollagen ihrer Knochen wies ähnliche Stickstoffwerte auf wie bei Raubtieren nördlicher Regionen, etwa Füchsen und Wölfen.

Richards sieht damit die Ansicht widerlegt, die Neandertaler seien auch deswegen untergegangen, weil sie sich nicht genügend Nahrung zu beschaffen verstanden. Vielmehr hält er sie – bei den Fleischmengen, die sie offenbar aßen – für versierte Jäger. Auch sonst finden Anthropologen und Archäologen immer mehr Hinweise darauf, dass die Fähigkeiten der Neandertaler bisher unterschätzt wurden (siehe SdW 6/2000, S. 42).

HELLIO & VAN INGEN, PHOTO RESEARCHERS, INC.

Anscheinend erlegten die Neandertaler sehr viel Wild, sicherlich auch Rentiere. Fleisch war ihre Hauptnahrung.



LAURIE GRACE

Kaum war *Homo erectus* entstanden, wurde ihm Afrika auch gleich zu eng. Dieser Frühmensch erschien schon vor rund 1,8 Millionen Jahren in fernen Regionen Asiens.

▷ Schweres Übergewicht tritt neuerdings auch in der Dritten Welt häufig auf. Noch vor weniger als einer Generation kam es dort fast nicht vor. Der Hintergrund ist, dass Menschen aus ländlichen Gebieten, die als Kind unterernährt waren und später in die Stadt zogen, dort viel mehr und kräftiger essen können.

Übergewicht bis hin zur Fettsucht – wie verschiedene andere Zivilisationskrankheiten – ist gewissermaßen die Folge des uralten Bestrebens, Energie aus der Nahrung in möglichst kompakter Form mit möglichst wenig Aufwand zu beziehen. Wir sind Opfer unseres eigenen evolutionären Erfolgs. Wir schmachten nach Kalorienbomben, aber die körperliche Arbeit, den Bewegungsaufwand, den frühere Menschen dafür leisten mussten, ersparen wir uns geflissentlich.

Fleisch oder Kohlenhydrate – egal

Wie groß dieses Missverhältnis ist, zeigen heutige Kulturen mit traditioneller Lebensweise. Die Evenki Sibiriens beziehen über vierzig Prozent ihrer täglichen Nahrungsenergie aus Fleisch. Das ergaben Studien, die ich in Zusammenarbeit mit Michael Crawford von der Universität von Kansas in Lawrence und Ludmilla Osipova von der russischen Akademie der Wissenschaften in Nowosibirsk durchführte. US-Amerikaner decken weniger als einen halb so großen Anteil ihres Energiebedarfs mit Fleisch. Zwar kommen in kleinerer Menge andere tierische Produkte hinzu. Dennoch ist der Unterschied deutlich (siehe Tabelle Seite 36). Es sollte nachdenklich stimmen, dass die Männer der Evenki um zwanzig Prozent magerer sind als amerikanische Männer und einen dreißig Prozent niedrigeren Cholesterinspiegel haben.

Zum einen hängt das mit dem Fettanteil der Kost zusammen. Bei Amerikanern beträgt der Energieanteil aus tierischen und pflanzlichen Fetten 35 Prozent, bei den Evenki nur zwanzig Prozent, denn ziehende Rentiere weisen einen geringeren Körperfettgehalt auf als Hausvieh. Außerdem setzt sich das Fett von frei lebenden Tieren günstiger zusammen: Es enthält weit weniger gesättigte und mehr mehrfach ungesättigte Fettsäuren. Zum anderen ist bei einem Kulturenvergleich zu beachten, dass ein Evenki bei seiner Lebensweise viel mehr Energie verbrennt als der Durchschnittsamerikaner.

Doch dass verschiedene Gesundheitsprobleme zunehmen, ist nicht den heutigen Ernährungsgewohnheiten allein anzulasten. Vielmehr passen Ernährung und Lebensweise oft schlecht zusammen. Auch wenn wir anders essen als unsere Vorfahren: Es gibt für den Menschen nicht die eine natürliche Ernährung – genauso wenig, wie Lebensmittel an sich gut oder schlecht sind. In diesem Sinne halte ich auch die Diskussionen darüber für zu einseitig, ob man bei einer Schlankheitsdiät besser auf Kohlenhydrate oder auf Fette verzichten sollte.

Wollte man unsere Spezies auf eine optimale Kost festlegen, wäre dies viel zu grob vereinfacht. Das Bemerkenswerte am Menschen ist gerade die außerordentliche Vielfalt und Verschiedenartigkeit der Ernährung. *Homo sapiens* kann sich in fast jedem Ökosystem der Erde behaupten. Manche Bevölkerungen extremer Lebensräume essen hauptsächlich tierische Nahrung – wie viele Bewohner arktischer Lebensräume –, andere fast nur Pflanzenkost, wie die Menschen in den hohen Anden, die weitgehend von Knollen und Getreide leben. Das Besondere der menschlichen Evolution war, dass unsere Urahnen mannigfaltige Wege fanden, unsere ureigenen Stoffwechselbedürfnisse zu befriedigen. Der Trend, der Natur energiereiche Nahrung immer effizienter abzuringen, setzt sich bis heute fort. Allerdings besteht die Herausforderung heute darin, nicht mehr zu essen, als wir auch verbrennen. ◁

William R. Leonard ist Professor für Anthropologie an der Northwestern University in Evanston (Illinois). Er promovierte 1987 an der Universität von Michigan in Ann Arbor. Leonard forscht über Ernährung und Energiebilanzen zeitgenössischer und prähistorischer Menschen. In Ecuador, Bolivien und Peru hat er eingeborene bäuerliche Kulturen untersucht, in Zentral- und Südsibirien Hirtenvölker.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

An Ecomorphological Model of the Initial Hominid Dispersal from Africa. Von Susan C. Antón, William R. Leonard und Marcia L. Robertson in: Journal of Human Evolution, Bd. 43, S. 773 (2002).

Ecology, Health and Lifestyle Change among the Evenki Herders of Siberia. Von W. R. Leonard et al. in: Human Biology of Pastoral Populations. Von W. R. Leonard und M. H. Crawford (Hg.). Cambridge University Press, 2002.

Human Biology: An Evolutionary and Biocultural Approach. Von Sara Stinson et al. (Hg.). Wiley-Liss, 2000.

Evolutionary Perspectives on Human Nutrition: The Influence of Brain and Body Size on Diet and Metabolism. Von W. R. Leonard und M. L. Robertson in: American Journal of Human Biology, Bd. 6, S. 77 (1994).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

1953

Neues Elektronenmikroskop

Das neue Instrument … schiebt die Grenze für den Einblick in die Welt des Kleinsten erneut weit zurück und erreicht nun fast das Äußerste des theoretisch überhaupt Möglichen. Das neue Übermikroskop vermag Objekte zu unterscheiden, die nur 6 zehnmillionstel Millimeter voneinander entfernt sind. … Es besitzt ein Auflösungsvermögen von 6 Angström, … während die bisherigen Elektronenmikroskope nur über ein Auflösungsvermögen von höchstens 40 Angström verfügen. *(Universitas, 8. Jg., Heft 5, 1953, S. 539)*

Heidelberger Armprothese für Amputierte

Das neue System beruht … auf der Verwendung von flüssiger Kohlensäure als Kraftquelle. Die Energie der freiwerdenden gasförmigen Kohlensäure soll die verlorengegangene Muskelkraft ersetzen. … Der Kraftstrom geht durch ein Schlauchsystem … zurück zu Luftbälgen, deren Füllung mit Gas die Bewegung der künstlichen Gliedmaßen bewirkt. … So kann beispielsweise durch leichtes Vornehmen der Schulter der Fingerschluß bewirkt werden. … Folgende willkürliche Bewegungen sind möglich: Fingergriff, Handdrehung, Beugung und Streckung des Ellenbogengelenkes und Heben des Armes in der Schulter. *(Die Umschau, 53. Jg., Heft 9, 1953, S. 280)*

Die Träger der neuen Heidelberger Armprothese erklären übereinstimmend ihre Zufriedenheit.

Elektronisches Gehirn statt Piloten

Die Bedienung eines Flugzeuges ist bereits heute so kompliziert, daß der Pilot nur mit verschiedenen Hilfseinrichtungen in der Lage ist, die Maschine sicher und gefahrlos zu manövrieren. Im Bestreben, die menschlichen Unzulänglichkeiten bei der Bedienung völlig auszuschalten, hat jetzt eine amerikanische Hochfrequenzfirma ein sogenanntes »master brain« entwickelt, das vollkommen selbständig sämtliche Tätigkeiten des Piloten vom Start bis zur Landung ausführt. Das Gerät, das nach dem Prinzip der Elektronengehirne arbeitet, benutzt dazu einen vorgestanzten Lochstreifen. Dadurch ist ein genauer Ablauf der auszuführenden Tätigkeiten wie Einhaltung der Flugrichtung usw. gewährleistet. *(Industriekurier Nr. 69, 1953, S.149)*

Die Strassenbahn als Luftreiniger

Sicherlich hat jedermann beobachtet, daß bei elektrischen Bahnen mit Oberleitung zwischen dem Leitungs- und Verbindungsdraht ein Ueberspringen von Funken stattfindet. … Eine große Menge elektrischen Fluidums, das von den Rädern ausgeht, gibt ebenfalls Veranlassung zu einer Funkenausströmung. … Es ist bekannt, daß diese elektrischen Entladungen den Sauerstoff der Luft in Ozon verwandeln, der außer seinen chemischen, in der Industrie verwendeten Eigenschaften desinfizierende und oxydierende Kraft hat. … So muß man hygienisches Lob den Straßenbahnen spenden. … Sie versorgen die Städte mit einem außerordentlich gesunden Lebens- und Atmungsfluidum. *(Elektrotechnische Rundschau, 20. Jg., Nr. 16, 1903, S. 165)*

Reich wie Theben

Die Ausgrabungen auf dem Stadtgebiet von Orchomenos, dessen Reichtum in der Ilias neben dem des ägyptischen Theben genannt wird, geben jetzt einen deutlichen Begriff von dem Alter und der Eigenart der Kultur der Minyer. Wie in Troja zeigt die Schuttmasse eine ausserordentliche Mächtigkeit, da die Schichten verschiedener Jahrhunderte übereinander liegen. In den Tiefen der altminyeischen Schicht überraschten vor allem … Gräber mit den in Hockerstellung in Lehmziegelsärge eingezwängten Leichen. Was in Troja vergeblich gesucht wurde, Bestattungen der alten vormykenischen Epochen, ist hier gefunden worden. *(Schweizerische Bauzeitung, Bd. XLI, Nr. 19, 1903, S. 217)*

1903

Sprudelbad für die Wanne

Die Kohlensäurebäder kommen in der Krankenbehandlung immer mehr in Aufnahme. Die chemische und mechanische Wirkung bringt einen unbeschreiblichen Reiz hervor, welcher von günstigem Einfluß auf das Nervensystem ist. … Mit Hilfe komplizierter Anlagen hat man Kohlensäurebäder hergestellt. … Aber hier war der Preis der allgemeinen Einführung hinderlich. … Die Sanitätswerke Moosdorf & Hochhäusler lösten die Frage in der einfachsten Weise. In jedem Dorf erhält man die … Kohlensäurebehälter, wie sie Gastwirte zum Abfüllen des Bieres benutzen. … Es ist nur nötig, sich einen Verteiler, wie abgebildet, von dieser Firma zu beschaffen, in die Badewanne einzulegen und durch einen Gummischlauch die Verbindung mit dem Behälter herzustellen. *(Gesundheits-Ingenieur, 26. Jg., Nr. 15, 1903, S. 247)*

Kohlensäurebad für zu Hause

Magnetare

Manche Neutronensterne haben derart starke Magnetfelder, dass sich auf ihnen höchst seltsame Ereignisse abspielen: Wie bei einem Erdbeben reißt ihre Oberfläche auf und setzt dabei gewaltige Energiemengen frei.

Von Chryssa Kouveliotou, Robert C. Duncan und Christopher Thompson

Montag, 5. März 1979. Die sowjetischen Raumsonden Venera-11 und -12, die vor wenigen Monaten Kapseln in die giftige Atmosphäre der Venus abgesetzt haben, ziehen auf elliptischen Bahnen durch das innere Sonnensystem. Ihre Reise ist bislang ohne größere Vorkommnisse verlaufen, und die Strahlungsmessgeräte auf beiden Sonden registrieren wie üblich um die hundert Ereignisse pro Sekunde. Aber um 16.51 Uhr MEZ schießt die Zählrate im Bruchteil einer Millisekunde auf über 200 000 pro Sekunde und damit über den anzeigbaren Messbereich hinaus: Ein heftiger Gammastrahlungspuls hat die Sonden getroffen.

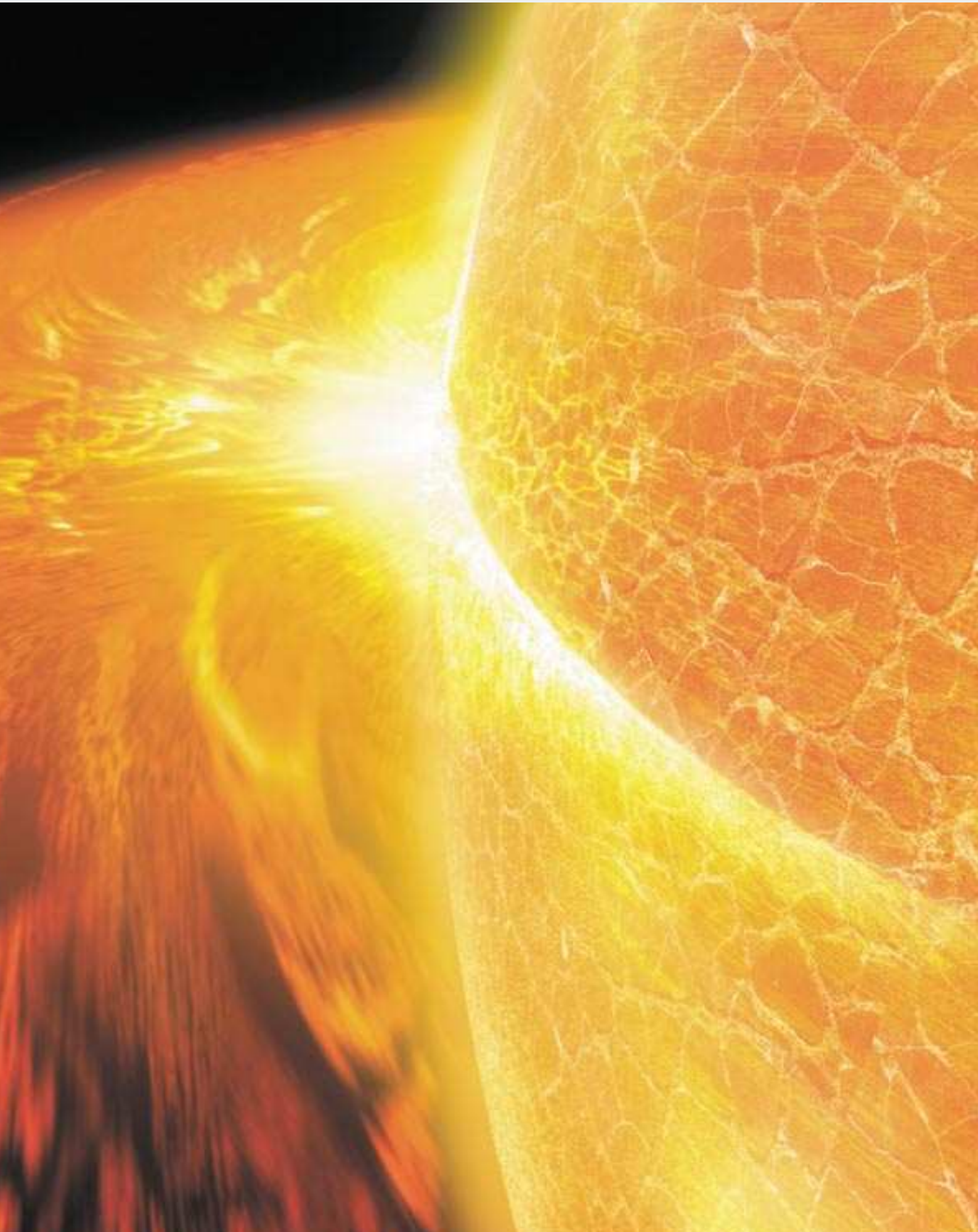
Elf Sekunden später überfluten Gammastrahlen die amerikanisch-deutsche Sonde Helios-2, die ebenfalls die Sonne umkreist. Offenbar durchquert eine ebene Wellenfront aus sehr energiereicher Strahlung das Sonnensystem. Als Nächstes trifft die Front den Orbiter der US-Sonde Pioneer-Venus, der sich in einer Umlaufbahn um unseren inneren Nachbarplaneten befindet, und treibt dessen Strahlungssensoren in die Sättigung. Und Sekunden später erreichen die Gammastrahlen die Erde. Die Detektoren auf drei Vela-Satelliten des US-Verteidigungsministeriums werden ebenso überflutet wie der sowjetische Satellit Prognos-7 und der US-Röntgensatellit Einstein. Und bevor der Gamma-Puls das Sonnensystem verlässt, trifft er auch noch den International Sun-Earth Explorer.

Dieser Puls aus besonders energiereicher – »harter« – Gammastrahlung ist hundertmal intensiver als jeder andere zuvor beobachtete Strahlenschauer, der das Sonnensystem durchdrang, und er dauert nur eine fünftel Sekunde. Niemand bemerkt etwas davon, und das Leben auf der Erde geht – unter der schützenden Atmosphäre – seinen gewohnten Gang. Auch alle zehn Satelliten überstehen den Schock ohne bleibende Schäden. Dem harten Puls folgt ein schwächeres Nachglühen aus weniger energiereicher – »weicher« – Gammastrahlung und Röntgenstrahlung, das in den nächsten drei Minuten beständig abnimmt. Und während das Signal verblasst, variiert seine Stärke mit einer Periode von acht Sekunden. Vierzehneinhalb Stunden später, um 7.17 Uhr am 6. März, kommt von derselben Stelle am Himmel ein weiterer, schwächerer Ausbruch von Röntgenstrahlung.

In den folgenden vier Jahren sichteten Jewgenij P. Masez vom Ioffe-Insti- ▷

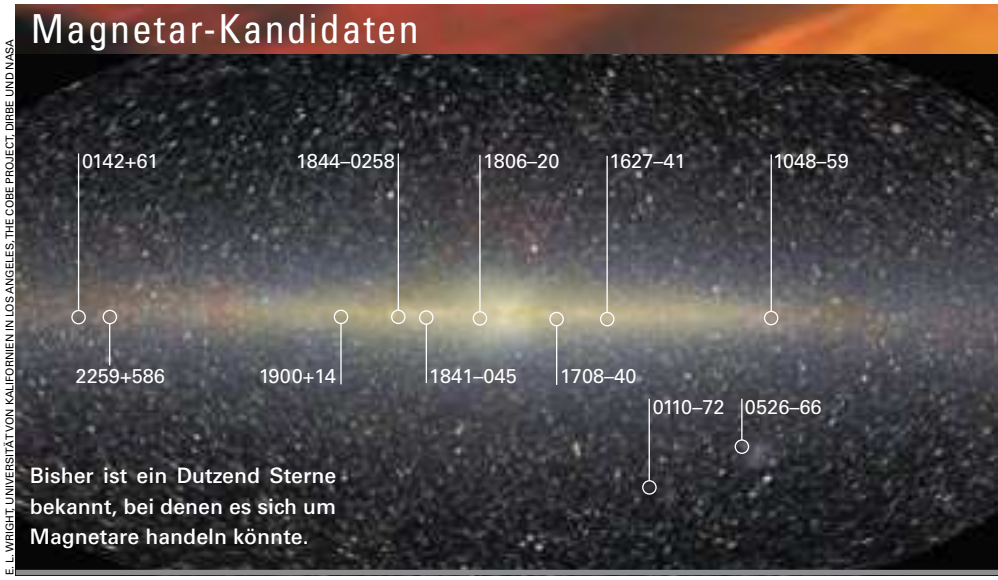
DON DIXON

Ein »Beben« auf der Oberfläche eines Magnetars setzt eine gewaltige magnetische Energie frei – vergleichbar der seismischen Energie eines Erdbebens der Stärke 21 auf der Richterskala – und lässt einen Feuerball brodelnden Plasmas entstehen.



▷ tut in St. Petersburg und seine Gruppe 16 Ausbrüche unterschiedlicher Stärke aus derselben Richtung. Aber keiner dieser Schauer erreichte die Intensität oder Dauer wie das Ereignis vom 5. März.

Die Astronomen hatten so etwas noch nie erlebt. Mangels besserer Ideen wurden die Ausbrüche zunächst in dieselben Kataloge aufgenommen wie die besser bekannten Gamma-Ray Bursts (GRBs), auch wenn sie sich klar in mehreren Aspekten davon unterschieden. Mitte der 1980er Jahre gewahrte Kevin C. Hurley von der Universität von Kalifornien in Berkeley, dass ähnliche Ausbrüche auch von zwei anderen Stellen am Himmel kamen. Offenbar wiederholten diese Quellen ihre Ausbrüche – ganz im Gegensatz zu den GRBs, die genau einmal auftreten (siehe »Die stärksten Explosionen im Universum«, Spektrum der Wissenschaft 3/2003, S. 48). Auf einer Konferenz im Juli 1986 im französischen Toulouse einigten sich die Beobachter auf die ungefähren Positionen der drei Quellen am Himmel und nannten sie »Soft Gamma Repeaters« (SGRs). Die Kürzelsprache der Astronomen hatte weiteren Zuwachs bekommen.



E. L. WRIGHT, UNIVERSITÄT VON KALIFORNIEN IN LOS ANGELES, THE COBE PROJECT, DIRBE UND NASA

Heller als Millionen Sonnen

Weitere sieben Jahre vergingen, bis zwei von uns (Duncan und Thompson) schließlich eine Erklärung für diese seltsamen Objekte vorschlugen. Und es sollte bis 1998 dauern, bis die Dritte von uns (Kouveliotou) mit ihrem Team überzeugende Belege für dieses Modell fand. Beobachtungen der letzten Zeit verbinden unsere Theorie sogar mit einer weiteren Klasse kosmischer Rätsel, den »anomalen Röntgen-Pulsaren« (Anomalous X-Ray Pulsars, AXPs). Diese Entwicklungen haben zu einem Durchbruch im Verständnis einer äußerst exotischen Objektklasse im Universum geführt, der Neutronensterne. Von allen bekannten Himmelskörpern haben Neutronensterne die höchste Dichte: In einer Kugel von nur zwanzig Kilometer Durchmesser ist etwas mehr als die Masse unserer Sonne hineingepackt. Den Untersuchungen von SGRs zufolge scheinen manche Neutronensterne derart starke Magnetfelder zu haben, dass sie die Materie in sich wie auch den Zustand des Quantenvakuums in ihrer Umgebung grundlegend verändern – was wiederum physikalische Effekte hervorruft, die nirgendwo sonst im Universum zu beobachten sind.

Da der Ausbruch vom März 1979 so stark gewesen war, vermuteten die Theoretiker zunächst, die Quelle müsse sich in unserer galaktischen Nachbarschaft befinden, höchstens einige hundert Lichtjahre von der Erde entfernt. In diesem Falle hätte die Intensität der Röntgen- und Gammastrahlung knapp unter der theoretischen Grenze für die typische Dauerleuchtkraft eines Sterns gelegen. Dieser Maximalwert, den der englische Astrophysiker Arthur Eddington 1926 abgeleitet hatte, wird vom Druck der Strahlung bestimmt, die durch die heißen äußeren Schichten des Sterns strömt: Wäre der Strahlungsdruck noch ein wenig höher, dann würde er die Schwerkraft übersteigen, ionisiertes Gas fortblasen und den Stern insgesamt destabilisieren. Emissionsstärken unterhalb dieser Eddington-Grenze wären ziemlich leicht zu erklären gewesen. Mehrere Theoretiker schlugen zum Beispiel vor, ein Ausbruch könne durch einen Materiebrocken wie etwa einen Asteroiden oder Kometen hervorgerufen werden, der auf einen Neutronenstern stürzt.

Aber die Beobachtungen zeigten etwas anderes. Jede Raumsonde hatte die Ankunftszeit des harten Anfangspulses registriert, sodass sich seine Herkunftsrichtung ermitteln ließ. Eine Gruppe um Thomas Lytton Cline vom Goddard-Raumflugzentrum der Nasa stellte fest, dass in dieser Richtung die Große Magellansche Wolke stand, ein kleines Sternsystem in 170 000 Lichtjahren Entfernung. Die Position des Ausbruchs fiel mit einem jungen Supernovarest zusammen, den Überbleibseln eines Sterns, der vor fünftausend Jahren explodiert war. Sofern diese Übereinstimmung kein Zufall war, musste die Quelle tausendmal weiter entfernt sein als die Theoretiker gemutmaßt hatten – und somit eine Million Mal heller als die Eddington-Grenze. In einer fünftel Sekunde hatte das Ereignis vom 5. März so viel Energie ausgestrahlt wie die Sonne in zehntausend Jahren – und das konzentriert in Form von

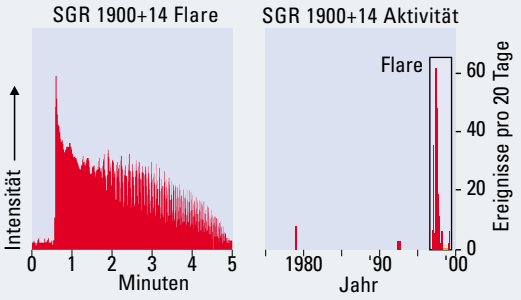
IN KÜRZE

- Die Astronomen haben rund ein Dutzend Sterne entdeckt, die in Sekundenbruchteilen immense Energiemengen in Form von Gamma- und Röntgenstrahlen aussenden können – millionenmal mehr als bei anderen Ausbrüchen üblich. Hinter diesen **kosmischen Blitzlampen** verbirgt sich offenbar eine spezielle Art von Neutronensternen. In diesen Himmelskörpern ist mehr als die Masse der Sonne in eine Kugel von zwanzig Kilometer Durchmesser zusammengequetscht.
- Diese speziellen Neutronensterne, genannt **Magnetare**, haben die stärksten Magnetfelder, die je gemessen wurden. Magnetische Instabilitäten, vergleichbar Erdbeben, können ihre Ausbrüche verursachen.
- Magnetare sind nur etwa **zehntausend Jahre lang aktiv**. Das könnte bedeuten, dass Millionen von ihnen unbemerkt durch die Milchstraße treiben.

Name	Entdeckungsjahr	Rotationsperiode in Sekunden
SGR 0526–66	1979	8,0
SGR 1900+14	1979	5,16
SGR 1806–20	1979	7,47
SGR 1801–23*	1997	?
SGR 1627–41	1998	?
AXP 1E 2259+586	1981	6,98
AXP 1E 1048–59**	1985	6,45
AXP 4U 0142+61	1993	8,69
AXP 1RXS 1708–40**	1997	11,0
AXP 1E 1841–045	1997	11,8
AXP AXJ1844–0258	1998	6,97
AXP CXJ0110–7211**	2002	5,44

* nicht in der Karte gezeigt ** abgekürzter Name

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER AUTOREN



Der gigantische Röntgenausbruch vom August 1998 wies auf eine neue Objektklasse, die Magnetare, hin. Der Ausbruch begann mit einem Strahlungsstoß, der weniger als eine Sekunde dauerte (oben links). Es folgte eine lange Serie von Pulsen mit einer Periode von 5,16 Sekunden. Dieses Ereignis war der stärkste Ausbruch von diesem Objekt namens SGR 1900+14 seit seiner Entdeckung 1979 (oben rechts).

Gammastrahlung und nicht über das gesamte Spektrum verteilt.

Kein gewöhnlicher Stern vermag eine solche Energiemenge freizusetzen. Demnach musste die Quelle ein exotisches Objekt sein – ein Schwarzes Loch etwa oder ein Neutronenstern. Ersteres schied jedoch aus, weil die Strahlung mit einer Periode von acht Sekunden fluktuiert: Ein strukturloses Schwarzes Loch kann keine regelmäßigen Pulse erzeugen. Die Verbindung mit einem Supernovarest sprach indes für einen Neutronenstern: Er entsteht, wenn ein massereicher Stern seinen Brennstoff verbraucht hat. Der Kern kollabiert dann unter seiner eigenen Schwerkraft, was eine heftige Supernova-Explosion auslöst.

Mit der Identifikation der Quelle als Neutronenstern war das Rätsel aber nicht gelöst – im Gegenteil, es wurde nur noch größer. Die Astronomen kannten bereits mehrere Neutronensterne in Supernovaresten: Sie machten sich als Pulsare bemerkbar, die in regelmäßiger Folge Radiopulse aussenden. Aber der Burster vom März 1979 drehte sich mit seiner scheinbaren Rotationsperiode von acht Sekunden viel langsamer als jeder damals bekannte Radiopulsar. Selbst wenn er keine Ausbrüche zeigte, strahlte er immer noch mehr Röntgenleistung ab, als allein die Rotation eines Neutronensterns liefern könnte. Zudem saß der Stern nicht in der Mitte des Supernovarests: Wenn er dort entstanden war, dann musste er mit etwa tausend Kilometer pro Sekunde davongeschossen sein. Solch eine hohe Raumgeschwindigkeit galt als ungewöhnlich für einen Neutronenstern.

Und schließlich entzogen sich auch noch die Ausbrüche selbst einer Erklärung. Röntgenblitze waren zwar schon bei einigen Neutronensternen gesehen worden, aber sie gingen nie weit über die Eddington-Grenze hinaus. Man schrieb sie der thermonuklearen Verschmelzung von Wasserstoff oder Helium zu oder dem plötzlichen Sturz von Materie auf den Stern. Die Ausbrüche der SGRs waren indes so außerordentlich hell, dass ein neuartiger physikalischer Mechanismus gefunden werden musste.

Gigantische »Sternbeben«

Der letzte Ausbruch der Quelle vom März 1979 wurde im Mai 1983 registriert; in den zwanzig Jahren seither hat es keinen weiteren gegeben. Zwei andere SGR, beide in unserem Milchstraßensystem gelegen, sind 1979 ebenfalls zum ersten Mal aufgetaucht und seither aktiv geblieben; Hunderte von Ausbrüchen wurden bereits gezählt. Ein vierter SGR wurde 1998 entdeckt. Drei dieser vier Objekte sind offenbar mit Supernovaresten assoziiert. Zwei liegen auch in der Nähe sehr dichter Haufen massereicher junger Sterne, was dafür spricht, dass die SGR aus solchen Sternen hervorgehen. Ein fünfter SGR-Kandidat ist bisher nur zweimal ausgebrochen, und seine Position ist noch nicht genau genug bekannt.

Erstaunlicherweise zeigen die Ausbrüche von SGRs eine gewisse Ähnlichkeit mit Erdbeben. Eine Gruppe um Baolian L. Cheng am Los-Alamos-Nationallaboratorium hat sich nämlich die Statistik beider Phänomene näher angesehen und herausgefunden, dass die Energien sehr ▷

▷ ähnlich verteilt sind: Je geringer die Energie der Ereignisse, desto häufiger treten sie auf. Auch andere statistische Eigenschaften teilen die Bursts mit Erdbeben, wie unser Doktorand Ersin Gögüs belegen konnte. Hier macht sich »selbst organisierte Kritizität« bemerkbar: Ein zusammengesetztes System erreicht einen kritischen Zustand, in dem schon eine kleine Störung eine Kettenreaktion auslösen kann. Solch ein Verhalten findet man in ganz verschiedenen Systemen – in aufgehäuftem Sand, der unvermittelt abrutscht, ebenso wie in magnetischen Ausbrüchen auf der Sonne.

Aber warum sollte sich ein Neutronenstern so verhalten? Die Lösung fand sich bei Untersuchungen an Pulsaren, die man allgemein als rasch rotierende Neutronensterne mit starken Magnetfeldern ansieht. Das Magnetfeld wird dabei durch elektrische Ströme tief im Stern hervorgerufen und rotiert mit ihm. Dabei senden die Magnetpole Radiowellen aus, die wegen der Rotation des Sterns wie die Lichtkegel eines Leuchtturms durch den Raum streichen. Ein Beobachter, der von den Strahlungskegeln erfasst wird, nimmt sie als regelmäßig wiederkehrende Blitze wahr. Der Pulsar bläst auch einen Wind aus geladenen Teilchen und elektromagnetischen Wellen niedriger Frequenz ab, der Energie und Drehimpuls fortträgt. Infolgedessen nimmt die Umdrehungsrate allmählich ab.

Der vielleicht berühmteste Pulsar befindet sich inmitten des Krebsnebels, des Überrests einer Supernova-Explosion im Jahr 1054. Der Pulsar rotiert mit einer Periode von 33 Millisekunden, wobei dieser Wert um 1,3 Millisekunden pro Jahrhundert zunimmt. Extrapoliert man dies zurück, dann muss die Periode anfangs 20 Millisekunden betragen haben. Irgendwann in ferner Zukunft dürfte die Rotationsgeschwindigkeit so weit abgenommen haben, dass die kinetische Energie nicht mehr für die Erzeugung der Radiopulse ausreicht. Die Abbremsrate ist für fast alle Pulsare gemessen worden, und der Theorie zufolge sollte sie von der Stärke des Magnetfelds abhängen: Für junge Radiopulsare erhält man Werte zwischen 10^{12} und 10^{13} Gauß. Zum Vergleich: Ein Magnet, wie er an haushaltsüblichen Magnettafeln benutzt wird, hat ein Feld von etwa 100 Gauß.

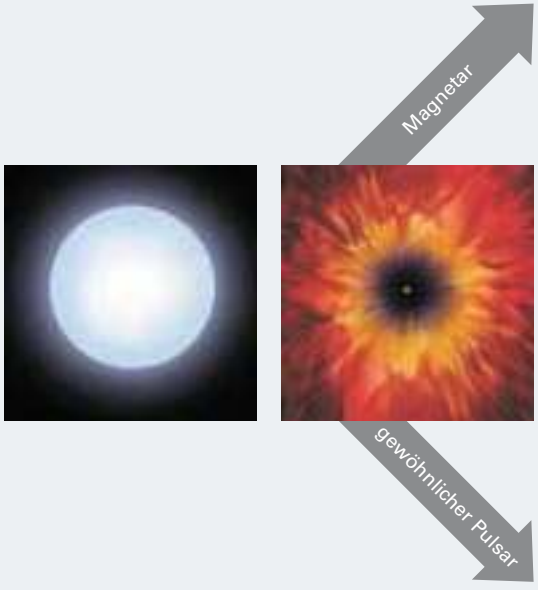
Die stärksten Magnetfelder im ganzen Universum …

Eine grundlegende Frage ist noch offen: Woher stammt das Magnetfeld eigentlich? Man könnte vermuten, dass es ein Relikt des Vorläufersterns ist, also aus der Zeit vor der Supernova-Explosion. Alle Sterne haben schwache Magnetfelder, und diese Felder können durch Kompression verstärkt werden. Gemäß der Maxwell-Gleichungen des Elektromagnetismus vervierfacht sich die Feldstärke, wenn ein magnetisiertes Objekt auf die Hälfte schrumpft. Der Kern eines massereichen Sterns kollabiert bei der Umwandlung in einen Neutronenstern auf ein Hunderttausendstel: Das Magnetfeld sollte mithin um den Faktor Zehnmilliarden stärker werden. Wenn das Feld des Kerns ausreichend stark gewesen wäre,

Zwei Arten von Neutronensternen

1 Die Vorläufer der Neutronensterne sind nach allgemeiner Auffassung massereiche, aber ansonsten gewöhnliche Sterne, mit der 8- bis 20fachen Masse der Sonne.

2 Derart massereiche Sterne beenden ihr Dasein als Supernovae des Typs II, wobei ihr Zentralbereich zu einer Art riesigem Atomkern aus Neutronen zusammenstürzt.



3 A: Wenn der neu entstandene Neutronenstern rasch genug rotiert, erzeugt er ein intensives Magnetfeld. In seinem Inneren verdrillen sich die Feldlinien.

4 A: Der Magnetar verfügt nun über verdrillte Feldlinien innen und über glatte Feldlinien außen. Ein eng gebündelter Radiostrahl kann ausgesendet werden.

5 A: Der alte Magnetar hat sich abgekühlt, und ein Großteil seines Magnetismus ist zerfallen. Er strahlt kaum noch Energie ab.

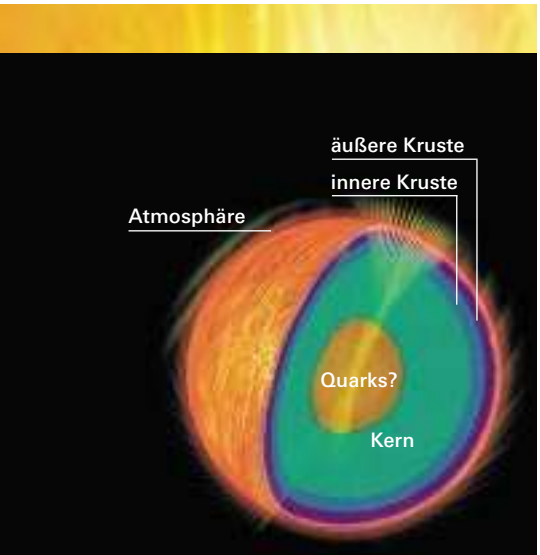
3 B: Wenn der neu entstandene Neutronenstern nur langsam rotiert, erreicht sein Magnetfeld nicht die Stärke wie in Magnetaren.

4 B: Im reifen Stadium ist der Pulsar kühler als ein Magnetar desselben Alters. Der emittierte Radiostrahl ist nicht so eng gebündelt.

5 B: Der alte Pulsar hat sich abgekühlt, und er sendet keine Radiostrahlen mehr aus.

dann könnte diese Kompression den Magnetismus der Pulsare erklären.

Leider kann man das Magnetfeld tief im Innern eines Sterns nicht messen und diese Hypothese mithin auch nicht testen. Es ist aber zu vermuten, dass Kompression nur ein Teil der Geschichte ist. Im Innern eines Sterns kann Gas durch Konvektion in Bewegung geraten: Heiße Bereiche aus ionisiertem Gas steigen auf, kühlere sinken ab. Weil ionisiertes Gas – ein so genanntes Plasma – Elektrizität gut leitet, werden magnetische Feldlinien mit dem Gas mitgeführt. Das Feld kann dadurch umgestaltet und unter Umständen auch verstärkt werden. Dieses Phänomen ist als Dynamoeffekt bekannt und gilt als Ursache der Magnetfelder von Sternen und Planeten. Ein Dynamo kann in jeder Entwicklungsphase eines massereichen Sterns funktionieren, solange das turbulente Innere schnell genug rotiert. Und während einer kurzen Phase nach der Verwandlung des stellaren Kerns in einen Neutronenstern ist die Konvektion besonders stark.



Der Aufbau eines Neutronensterns kann aus Theorien der Kernmaterie abgeleitet werden. Die Kruste ist fest; in ihr sind Atomkerne und Elektronen wohl in einem regelmäßigen Gitter angeordnet. Reißt dieses Gitter, dann ereignet sich ein Sternbeben. Der Kern besteht aus Neutronen, sein innerer Teil vielleicht auch aus Quarks. Eine »Atmosphäre« aus heißem Plasma wäre allenfalls ein paar Zentimeter dick.

Das haben erstmals Adam Burrows von der Universität von Arizona und James M. Lattimer von der Staats-Universität von New York in Stony Brook 1986 mit Computersimulationen gezeigt: Die Temperatur in einem gerade entstandenen Neutronenstern erreicht demnach 30 Milliarden Kelvin. Heißes Kerngas kreist in zehn Millisekunden oder weniger und enthält eine enorme kinetische Energie. Innerhalb von etwa zehn Sekunden kommt die Konvektion zum Erliegen.

Im Jahr darauf rechneten die zwei Theoretiker unter uns (Duncan und Thompson) aus, was diese furiose Konvektion für den Magnetismus eines Neutronensterns bedeutet. Die Sonne, die eine sehr gemäßigte Version desselben Vorgangs erlebt, möge hier als Anhaltspunkt dienen. Während das solare Gas zirkuliert, reißt es die Magnetfeldlinien mit und verliert etwa zehn Prozent seiner kinetischen Energie an das Feld. Wenn genau dasselbe in einem gerade entstandenen Neutronenstern abliefe, dann würde sein Feld auf über 10^{15} Gauß anschwellen, tausendmal stärker als bei den meisten Radiopulsaren beobachtet.

Ob der Dynamo global funktioniert (und nicht nur in begrenzten Gebieten), hängt davon ab, ob die Rotationsrate des Sterns mit der Konvektionsrate vergleichbar ist. Tief im Innern der Sonne sind die beiden Raten ähnlich, und das Magnetfeld kann sich auf großen Skalen selbst organisieren. Entsprechend sollte ein Neutronenstern, der bei seiner Entstehung schneller rotiert als mit der Konvektionsperiode von zehn Millisekunden, ein weit verteiltes, ultrastarkes Magnetfeld ausbilden können. 1992 gaben wir diesen hypothetischen Neutronensternen einen Namen: »Magnetare«.

Die Obergrenze für den Magnetismus von Neutronensternen liegt bei etwa 10^{17} Gauß. Jenseits davon würde sich das Gas innerhalb des Sterns durchmischen und das Feld abbauen. Kein bekanntes Objekt im Universum kann stärkere Magnetfelder erzeugen oder erhalten. Eine indirekte Folge unserer Rechnungen ist, dass Pulsare Neutronensterne sind, bei denen der großskalige Dynamo versagt hat. Im Krebspulsar zum Beispiel hatte der Dynamo nie eine Chance anzuspringen, weil die Umlaufperiode mit anfangs zwanzig Millisekunden schon viel länger war als die Konvektionsrate.

Das Konzept der Magnetare hatten wir zwar nicht entwickelt, um die SGR zu erklären, aber die Bedeutung dafür wurde uns bald klar. Das Magnetfeld sollte auf die Rotation des Magnetars wie eine Bremse wirken. Innerhalb von fünftausend Jahren würde ein Feld von 10^{15} Gauß die Umlaufperiode auf acht Sekunden erhöhen – das würde genau die Oszillationen erklären, die beim Ausbruch vom März 1979 beobachtet wurden.

Während sich das Feld entwickelt, ändert es seine Gestalt und treibt elektrische Ströme entlang der Feldlinien außerhalb des Sterns an. Diese Ströme aus geladenen Teilchen erzeugen wiederum Röntgenstrahlung. Zugleich verbiegt und verzerrt das Magnetfeld die feste Kruste des Magnetars, die es durchdringt. Dadurch heizt sich das Sterninnere auf – und gelegentlich bricht die Kruste, sodass es zu einem mächtigen »Sternbeben« kommt. Dabei wird magnetische Energie freigesetzt, wodurch eine dichte Wolke aus Elektronen und Positronen entsteht und ein Blitz aus weicher Gammastrahlung abgestrahlt wird: Das erklärt die schwächeren Ausbrüche, die den SGRs ihren Namen gegeben haben.

… rufen eine seltsame Physik hervor

Weniger häufig kommt es aber vor, dass das Magnetfeld instabil wird und sich in großem Stil umorganisiert. Ähnliche – aber viel kleinere Umwälzungen – gibt es zuweilen auf der Sonne, wo sie zu den Flares führen. Die Energie eines Magnetars reicht ohne weiteres aus, um einen gewaltigen Flare wie das Ereignis vom März 1979 hervorzurufen. Der Theorie zufolge sollte die Abstrahlung während der ersten halben Sekunde dieses enormen Ausbruchs von einem expandierenden Feuerball stammen. 1995 schlugen wir vor, dass ein Teil des Feuerballs von den Magnetfeldlinien nahe dem Stern festgehalten wurde. Dieser Teil wäre dann allmählich geschrumpft und verdampft, wobei er die ganze Zeit über im Röntgenbereich strahlte. Aus der freigesetzten Energie berechneten wir die Magnetfeldstärke, die nötig ist, den enormen Druck des Feuerballs zu kompensieren: mehr als 10^{14} Gauß. Dieser Wert steht im Einklang mit der Feldstärke, die sich aus der Abbremsung der Rotation ergibt.

Eine unabhängige Abschätzung der Feldstärke hatte schon 1992 Bohdan Paczyński in Princeton geliefert: Ihm war aufgefallen, dass Röntgenstrahlung leichter durch eine Elektronenwolke dringt, wenn die geladenen Teilchen in ein sehr ▷

▷ starkes Magnetfeld eingebettet sind. Damit die Röntgenstrahlung während des Ausbruchs so intensiv sein konnte, musste das Magnetfeld stärker als 10^{14} Gauß gewesen sein.

Testen des Modells

Die Theorie ist allerdings heikel, denn damit wären die Felder stärker als die quantenelektrodynamische Grenze von 4×10^{13} Gauß. In solch enormen Feldern gehen seltsame Dinge vor. Röntgenquanten spalten sich plötzlich in zwei, oder zwei verschmelzen zu einem. Das Vakuum selbst ist polarisiert und wird stark doppelbrechend, ähnlich wie ein Calcitkristall. Atome werden in lange Zylinder verformt, die dünner sind als die quantenrelativistische Wellenlänge eines Elektrons (siehe Kasten rechts). All diese seltsamen Phänomene sollten beobachtbare Spuren auf Magnetaren hinterlassen.

Während diese theoretischen Vorstellungen langsam vorankamen, versuchten die Beobachter noch immer, die Himmelsobjekte aufzuspüren, die hinter den Ausbrüchen steckten. Die erste Möglichkeit ergab sich im Oktober 1993, als das Compton Gamma Ray Observatory der Nasa einen Gammastrahlungsausbruch registrierte. Darauf hatte Kouveliotou nur gewartet, seit sie zum Compton-Team gestoßen war. Der Detektor konnte die Position des Bursts allerdings nur vage angeben. Unterstützung kam von japanischen Kollegen, die den Röntgensatelliten ASCA betrieben. Dieser fand in der fraglichen Himmelsgegend eine Röntgenquelle, die eine Weile konstant leuchtete und dann erneut ausbrach: Es war ein SGR, und zwar einer, den man schon von 1979 her kannte und der die Katalogbezeichnung SGR 1806–20 trug. Jetzt ließ sich seine Position genauer angeben, und er konnte im gesamten elektromagnetischen Spektrum überwacht werden.

Den nächsten Fortschritt gab es zu verzeichnen, als die Nasa 1995 den Rossi X-Ray Timing Explorer (RXTE) startete. Dieser Satellit kann die Intensitätsschwankungen von Röntgenquellen mit hoher Zeitauflösung verfolgen. Mit seiner Hilfe zeigte Kouveliotou, dass SGR 1806–20 mit einer Periode von 7,47 Sekunden oszillierte – erstaunlich nahe an der 8,0-Sekunden-Periode des Bursts vom März 1979. Innerhalb von fünf Jahren nahm die Rotationsgeschwindigkeit des SGRs um rund ein Fünfhundertstel ab. Diese Abbremsung mag gering erscheinen, doch ist sie stärker als bei jedem Radiopulsar. Und sie impliziert ein Magnetfeld von fast 10^{15} Gauß.

Um aber das Magnetar-Modell genauer testen zu können, benötigten die Astronomen einen zweiten Riesen-Flare. Der Himmel spielte mit: Am 27. August 1998 spülte eine noch intensivere Welle von Gamma- und Röntgenstrahlung über die Erde hinweg als 19 Jahre zuvor bei dem Ausbruch, der die SGR-Forschung begründet hatte. Diesmal wurden die Detektoren von sieben Satelliten bis an ihre Messgrenze oder darüber hinaus getrieben. Das Gammastrahlen-Spektrometer auf der Raumsonde NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous) fiel sogar für eine Stunde aus. Die Gammastrahlen trafen die Erde auf der Nachtseite, und die Quelle stand von der Mitte des Pazifischen Ozeans aus gesehen im Zenit.

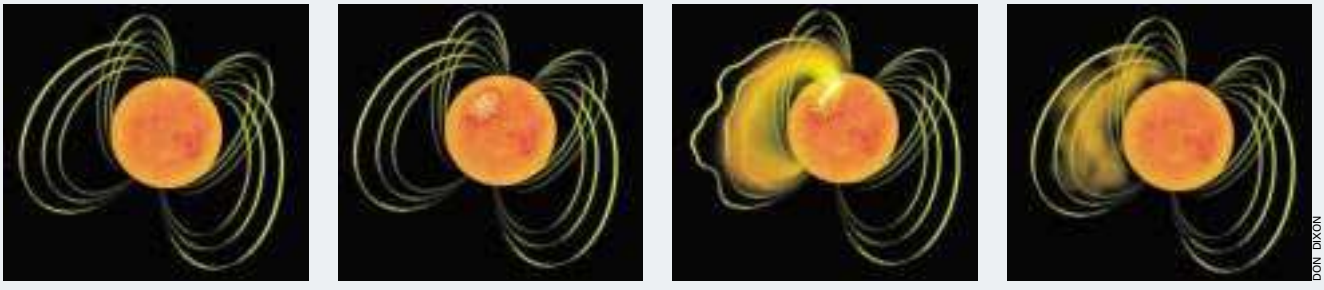
Wie es der Zufall wollte, sammelten in diesem Moment der Elektroingenieur Umran S. Inan und seine Kollegen von der Stanford-Universität Daten über die Ausbreitung sehr niederfrequenter Radiowellen rund um die Erde. Um 3.22 Uhr Pazifischer Sommerzeit (12.22 Uhr MESZ) bemerkten sie eine abrupte Veränderung in der ionisierten oberen Atmosphäre. Der untere Rand dieser Ionosphäre sank für fünf Minuten von 85 auf 60 Kilometer. Es ist schon erstaunlich: Diesen Effekt auf unseren Planeten verursachte ein Neutronenstern, der rund 20 000 Lichtjahre entfernt ist. Ähnlich starke Auswirkungen auf die Ionosphäre hat sonst nur die aufgehende Sonne.

Magnetare stecken auch hinter anderen Himmelsobjekten

Der Flare vom 27. August erwies sich als fast perfekte Kopie des Ereignisses vom März 1979. Absolut gesehen war er nur ein Zehntel so stark gewesen, aber weil die (ebenfalls seit 1979 bekannte) Quelle mit der Katalogbezeichnung SGR 1900+14 der Erde näher stand, wurde der Ausbruch zum stärksten, der je gemessen wurde. Die letzten Minuten des Ausbruchs zeigten auffällige Pulsationen, mit einer Periode von 5,16 Sekunden, und schon seit April 1998, als SGR 1900+14 wieder aktiv geworden war, war diese Periode in Satellitenmessungen angedeutet gewesen. Kouveliotou und ihr Team maßen mit dem RXTE die Abbremsrate: Sie war ähnlich groß wie bei SGR 1806–20, was auf ein vergleichbares Magnetfeld

Wie Sterne beben

Das Magnetfeld des Magnetars ist so gewaltig, dass die feste Kruste gelegentlich aufreißt und wie bei einem Erdbeben schlagartig Energie freisetzt.



1 Die meiste Zeit verhält sich ein Magnetar ruhig, doch bauen sich langsam magnetische Spannungen auf.

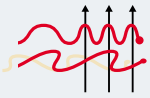
2 Wenn die Spannung zu groß wird, reißt die Kruste auf und zerplatzt möglicherweise in mehrere Teile.

3 Dieses »Sternbeben« erzeugt einen elektrischen Strom, dessen Energie sich in einen Feuerball umwandelt.

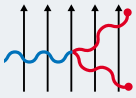
4 Der Feuerball kühlt sich durch Emission von Röntgenstrahlung ab und verdampft innerhalb von Minuten.

Extremer Magnetismus

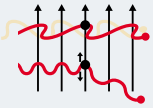
Die Magnetfelder von Magnetaren verändern die Eigenschaften von Strahlung und Materie auf dramatische Weise:



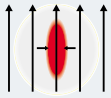
Vakuum-Doppelbrechung
Polarisierte Lichtwellen (orange) ändern ihre Geschwindigkeit und Wellenlänge, wenn sie ein extrem starkes Magnetfeld (schwarze Pfeile) passieren.



Photonenspaltung
Durch einen verwandten Effekt teilen sich Röntgenphotonen in zwei oder verschmelzen. Dieser Vorgang erfordert Magnetfeldstärken von 10^{14} Gauß und mehr.



Streu-Unterdrückung
Eine Lichtwelle kann ungestört an Elektronen (schwarze Kreise) vorbeiziehen, wenn das Feld die Elektronen daran hindert, mit der Welle zu schwingen.



Atomverzerrung
Felder stärker als 10^9 Gauß zwingen die Orbitale von Elektronen in Zigarrenform. In einem Feld von 10^{14} Gauß ist ein Wasserstoffatom nur ein Zweihundertstel so breit wie normal.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

hinwies. Ein weiterer SGR wurde damit als Magnetar eingestuft.

Da die Position der SGRs über ihre Röntgenstrahlung präzise bestimmt werden konnte, können sie nun auch im Radiobereich und im Infraroten untersucht werden (allerdings nicht im sichtbaren Licht, das von interstellarem Staub absorbiert wird). Andere Beobachtungen haben gezeigt, dass die SGR auch zwischen den Ausbrüchen Energie freisetzen, allerdings vergleichsweise wenig. Doch immerhin steckt in diesem Röntgenglühen zehn- bis hundertmal mehr Leistung, als die Sonne im sichtbaren Licht ausstrahlt.

Im Grunde sind die Magnetfelder der Magnetare bereits besser untersucht als die der Pulsare. Im Falle von einzeln stehenden Pulsaren liefert die Abbremsrate ihrer Rotation praktisch den einzigen Hinweis auf Feldstärken von bis zu 10^{12} Gauß. Für Magnetare hingegen ergibt die Kombination aus Bremsrate und hellen Röntgenflares mehrere unabhängige Indizien für Feldstärken von 10^{14} bis 10^{15} Gauß. Und vor kurzem berichteten Alaa Ibrahim vom Goddard-Raumflugzentrum der Nasa und seine Koautoren sogar noch über einen weiteren Hinweis: Bestimmte Röntgenlinien, mit dem Satelliten RXTE registriert, scheinen von Protonen herzurühren, die in einem Feld von 10^{15} Gauß herumschwirren.

Es stellt sich natürlich die Frage, ob die Magnetare außer mit den SGRs noch mit anderen kosmischen Phänomenen verwandt sind. Kandidaten hierfür sind beispielsweise die besonders kurzen Gammastrahlungsausbrüche. Möglicherweise sind einige von ihnen auf Flares zurückzuführen, die sich auf Magnetaren in fernen Galaxien ereignen. Wegen der enormen Entfernung würde nämlich selbst ein gigantischer Ausbruch kaum über der Nachweisgrenze heutiger Teleskope liegen. Nur der harte, intensive Gammapuls ganz am Anfang des Flares wäre mit geeigneten Detektoren als Gamma-Ray Burst zu entdecken.

Variation im Gleichtakt

Thompson und Duncan mutmaßten Mitte der 1990er Jahre, dass Magnetare auch die anomalen Röntgen-Pulsare, die AXPs, erklären könnten. Diese Objektklasse ähnelt den SGRs in mehrfacher Hinsicht, doch war lange Zeit kein Ausbruch eines AXPs bekannt. Inzwischen aber konnte ein Team der McGill-Universität bei zwei der sieben bekannten AXPs solche Bursts sichten. Eines dieser Objekte ist mit einem jungen Supernovarest im Sternbild Cassiopeia verknüpft.

Ein weiterer AXP in diesem Sternbild ist der erste Magnetar-Kandidat, der auch im sichtbaren Licht identifiziert wurde. Die optische Helligkeit variiert im Gleichtakt mit der Röntgenhelligkeit des Neutronensterns. Diese Beobachtungen weisen auf einen Magnetar hin und widersprechen einer anderen Erklärung, derzufolge AXPs gewöhnliche, von einer Materiescheibe umgebene Neutronensterne sein könnten.

Die kürzlichen Entdeckungen wie auch die nun schon fast zwanzig Jahre währende Ruhe in der Großen Magellanschen Wolke lassen vermuten, dass Magnetare ihren Zustand völlig verändern können. Nach jahrelangem Dämmerschlaf können sie plötzlich Phasen extremer Aktivität durchmachen. Manche Astronomen halten AXPs für im Mittel jünger als SGRs, aber darüber wird noch diskutiert. Wenn sowohl SGRs wie AXPs Magnetare sind, dann dürfte ein beachtlicher Teil der Neutronensterne in diese Kategorie fallen.

Die Geschichte der Magnetare zeigt uns erneut, wie wenig wir immer noch von den Vorgängen im Universum verstehen. Unter den Abermilliarden Sternen haben wir bislang höchstens ein Dutzend Magnetare identifiziert. Sie offenbaren sich nur für einen Sekundenbruchteil, und nur mit aufwendigen Spezialteleskopen sind sie überhaupt zu erkennen. Innerhalb von zehntausend Jahren frieren ihre Magnetfelder ein, und sie hören auf, Röntgenstrahlen auszusenden. Dieses Dutzend Magnetare gleicht somit der Spitze eines Eisbergs. Möglicherweise gibt es einige Millionen dieser Objekte in unserem Milchstraßensystem: alte Magnetare, die schon längst unsichtbar geworden sind und als dunkle Sternleichen einsam durch den interstellaren Raum ziehen. ◁

Chryssa Kouveliotou (links) ist beobachtende Astronomin am National Space Science and Technology Center in Huntsville (Alabama). **Robert C. Duncan** (Mitte) ist Theoretiker an der Universität von Texas in Austin. **Christopher Thompson** arbeitet ebenfalls als Theoretiker am Canadian Institute for Theoretical Astrophysics in Toronto. Schon seit langem an exotischen Himmelskörpern interessiert, forschen sie seit fünf Jahren gemeinsam über Magnetare.

Flash! The Hunt for the Biggest Explosions in the Universe. Von Govert Schilling. Cambridge University Press, 2002.

An X-Ray Pulsar with a Superstrong Magnetic Field in the Soft Gamma-Ray Repeater SGR1806–20. Von C. Kouveliotou et al. in: Nature, Bd. 393, S. 235 (21. Mai 1998).

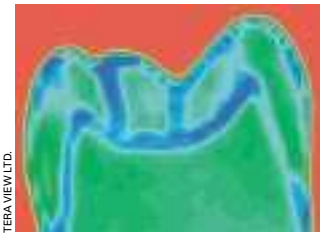
Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

PHYSIK

Tieferer Blick dank Terahertz-Strahlen

Heimliches Öffnen von Briefen über dem Wasserbad dürfte sich bald erübrigen: kann man den Inhalt doch einfach durchs geschlossene Kuvert hindurch lesen. Das ist nur eine der fantastischen Möglichkeiten, die die neuartige Terahertz-Strahlung eröffnet. Forscher erhoffen sich vor allem wertvolle Blicke in das Innere lebender Zellen oder auf tief liegende Karies und verborgene Krebsgeschwüre. Im elektromagnetischen Spektrum zwischen Mikrowellen und Infrarotlicht angesiedelt, kann Terahertz-Strahlung viele Stoffe oder Gewebe mühelos durchdringen, ohne Schäden zu hinterlassen. Zahlreiche Materialien weisen in diesem Wellenlängenbereich aber auch charakteristische Absorptionsmuster auf und lassen sich daher identifizieren. Bisher war es allerdings nicht möglich, Terahertz-Strahlung in der nötigen Intensität zu erzeugen. Das schafften nun Forscher am Berliner Elektronenspeicherring für Synchrotronstrahlung (Bessy II), indem sie den Durchmesser der umlaufenden Elektronenpakete so weit schrumpften, dass er ungefähr der Länge von Terahertz-Wellen entsprach. Der resultierende intensive Strahl mit den Eigenschaften eines Lasers dürfte in Medizin, Physik, Sicherheitstechnik und Weltraumforschung breite Anwendung finden. *(Physical Review Letters, 7.3.2003, 094801)*



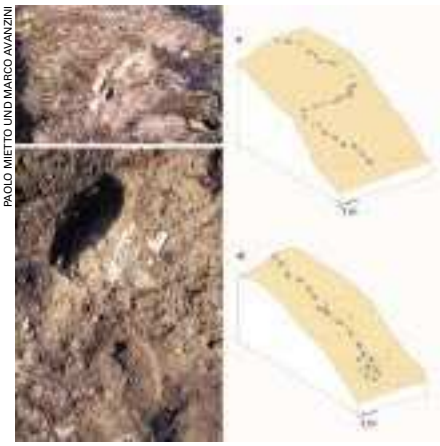
TERA VIEW LTD.

▲ Durchleuchtung eines Zahns mit Terahertz-Strahlen

PALÄANTHROPOLOGIE

Älteste Fußspuren von *Homo*

Vor 385 000 bis 325 000 Jahren erklomm offenbar eine Menschengruppe den 1000 Meter hohen Roccamonfina in der heutigen süditalienischen Region Campania. Beim Abstieg durch die frischen Aschefelder des damals aktiven Vulkans hinterließen die Kletterer drei Reihen von Fußstapfen. Es sind die frühesten bekannten Abdrücke von Vertretern der Gattung *Homo*. Dagegen stammen die 3,6 Millionen Jahre alten Fußspuren im tansanischen Laetoli von einem Vorläufer des Menschen, wohl einem Australopithecinen. Der Volksmund schrieb die Abdrücke im Roccamonfina dem Teufel zu. Doch Guiseppe Rolandi und seine Kollegen von der Universität Neapel konnten nun nachweisen, dass sie von aufrecht gehenden Menschen stammen. So zeigen einige Stapfen Umrisse von Ferse, Fußballen und sogar Zehen. An steilen Stellen finden sich auch Abdrücke von den Handballen der sich abstützenden Kraxler. Da die Fußspuren Schuhgröße 30 entsprechen, waren ihre Urheber kaum größer als 1,50 Meter. Der Altersbestimmung nach handelt es sich um europäische Abkömmlinge des *Homo erectus*. (Nature, 13.3.2003, S. 133)



PAOLO MIETTO UND MARCO AVANZINI

▲ Trittspuren in der Vulkanasche: Während ein Frühmensch in Serpentinen abstieg (oben), nahm ein anderer die direkte Route und stützte sich teils mit der Hand ab (unten).

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY

◀ Die Dunkelwolke Barnard 68 zittert wie ein überdimensionaler Wackelpudding.

ASTRONOMIE

Bebende Dunkelwolke

Etwa 400 Lichtjahre von der Erde entfernt liegt ein düsterer Ort: die Dunkelwolke Barnard 68. Derart dicht ballen sich dort Gas und Staub, dass kein Lichtstrahl hindurchdringt. Mit 1,5 Sonnenmassen an Materie und dem 300fachen Durchmesser des Sonnensystems könnte die Wolke die Wiege neuer Sterne sein. Charles Lada und Kollegen am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts) nahmen sie daher mit dem spanischen Iram-Radioteleskop ins Visier. Doch sie wurden enttäuscht: Sie entdeckten weder eine Rotation noch ein Kollabieren der Wolke – Anzeichen für den Beginn einer Sterngeburt. Dafür zieht sich das Objekt an einzelnen Stellen zusammen und dehnt sich an anderen aus. Insgesamt zittert die Wolke also wie überdimensionaler Wackelpudding. Der Grund ist noch unklar. Lada tippt auf die Stoßfront einer Supernova, die Barnard 68 vor kurzem erreicht haben könnte. *(The Astrophysical Journal, 20.3.2003, S. 286)*

MIKROBIOLOGIE

Magenbakterium enthüllt Wanderwege

Des Menschen treuester Begleiter ist offenbar nicht der Hund, sondern das Magenbakterium *Helicobacter pylori*. Mikrobiologen am Berliner Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie wollen die uralte gemeinsame Geschichte von Parasit und Wirt dazu nutzen, frühe Wanderungsbewegungen des Menschen nachzuvollziehen. Dazu überprüften sie zunächst mit Hilfe genetischer Methoden das Verwandtschaftsverhältnis der Bakterien in verschiedenen Ländern. Dabei konnten sie mit einem neuen Rechenverfahren fünf Urpopulationen rekonstruieren, aus denen sich die heutigen sieben Stämme von *H. pylori* entwickelten. Wie sich herausstellte, besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Verbreitung der Nachkommen dieser bakteriellen Gründergenerationen und den frühen Migrationsbewegungen ihrer menschlichen Wirte. Während etwa so gut wie alle modernen ostasiatischen Magenbakterien auf eine einzige lokale Urpopulation zurückzuführen sind, hat der moderne europäische Vertreter von *H. pylori* einen zentralasiatischen und einen nahöstlichen Vorfahren. Nun wollen die Forscher den Spieß umdrehen und mit Hilfe der Magenbakterien unter anderem endlich die alte Streitfrage klären, ob die Bewohner Polynesiens aus Ostasien oder aus Südamerika stammen. *(Science, 7.3. 2003, S. 1528)*

A. B. DOWSETT/SPL/AG. FOCUS

► Folgt dem Menschen auf Schritt und Tritt: der Magenparasit *Helicobacter pylori*.

HIRNFORSCHUNG

Nur Autos im Kopf

Autofans erkennen ihre Lieblingsobjekte genau so treffsicher auf den ersten Blick wie andere Menschen Gesichter – und benutzen dazu auch dieselbe Hirnregion. Das entdeckten Forscher um Isabel Gauthier von der Vanderbilt-Universität in Nashville (Tennessee). Sie zeigten zwanzig Autoliebhabern am Bildschirm Fotos von motorisierten Untersätzen und Gesichtern. Per Tastendruck mussten die Probanden kundtun, ob ein neues Bild dasselbe Objekt zeigt wie das vorherige. Zugleich wurden mit Elektroden auf der Kopfhaut die Gehirnwellen erfasst. Das erstaunliche Ergebnis: Während die Autofreunde jedes Fahrzeug sofort erkannten, hatten sie bei Gesichtern Probleme. Die Erklärung fand sich im Hirnstrombild: Die Fans der flotten Flitzer verarbeiten den Anblick eines Autos im selben Cortexareal, das sonst blitzartig Gesichter identifiziert. Die derart missbrauchte Region kommt bei ihrer eigentlichen Aufgabe dann ins Stolpern. *(Nature Neuroscience, 4/2003, S. 428)*

TIM CURRAN, UNIVERSITÄT VON COLORADO

▲ Proband mit Haube aus Elektroden beim Erkennen von Autos

MEDIZIN

Antikörper gegen Prionen

Der Rinderwahnsinn BSE und die gefürchtete Creutzfeldt-Jacob-Krankheit werden von einem ebenso ausgefallenen wie tückischen Erreger verursacht: einem deformierten »Prion«, das den normalen, körpereigenen Proteinen seine fehlerhafte Gestalt aufzwingt. Aus diesem Grund gibt es bisher kein Mittel gegen seine Ausbreitung im befallenen Organismus. Doch jetzt ist es dem Team um Simon Hawke am Imperial College in London gelungen, im Labor Antikörper herzustellen, die sich spezifisch an die krankmachende Form des Prionproteins heften und sie dadurch neutralisieren. Die Wissenschaftler spritzten diese Antikörper Mäusen, die sie zuvor mit Scrapie infiziert hatten: einer Prionerkrankung, die normalerweise Schafe befällt. Die behandelten Tiere blieben gesund und zeigten selbst nach 300 Tagen noch keine Symptome, als ihre unbehandelten Artgenossen längst an der Krankheit gestorben waren. Dieser Erfolg weckt Hoffnungen, mit der gleichen Strategie auch andere Prionerkrankungen – insbesondere beim Menschen – bekämpfen zu können. Allerdings attackierten die therapeutischen Antikörper nur Prionen in der Milz und einigen anderen Körpergeweben, gelangten aber nicht ins Gehirn, wo die krankmachenden Proteine den größten Schaden anrichten. *(Nature, 6.3.2003, S. 80)*

Potente Zellen

Die Forschung mit menschlichen embryonalen Stammzellen ist ethisch umstritten und Thema vieler Diskussionen – aber sie birgt auch ein großes Potenzial zur Heilung schwerer Krankheiten.

Von Michael Feld und Jürgen Hescheler

Es begann alles 1998, als James A. Thomson und seinen Mitarbeitern von der Universität von Wisconsin in Madison ein großer Coup gelang: die kontinuierliche Vermehrung humaner embryonaler Stammzellen. Sein Erfolg bedeutete nicht nur einen großen wissenschaftlichen Fortschritt; er setzte auch eine heftige Diskussion über das Selbstverständnis des Menschen in Gang. Sie zieht nicht bloß Wissenschaftler und Ärzte in ihren Bann, sondern große Teile der Gesellschaft insgesamt – nicht zuletzt, weil weit reichende politische Grundsatzentscheidungen abverlangt werden. Noch bis vor wenigen Jahren in der Öffentlichkeit nahezu unbeachtet, wurde die jahrzehntelange Stammzellforschung somit plötzlich zum medienwirksamen Schauplatz von Politikern, Ethikern, Theologen und selbst zahlreichen Wissenschaftlern. Schreckensvisionen von »Embryonentötung« und geklonten Menschen wechseln sich seither ab mit manch unseriösen Heilungsversprechen und vermeintlichen Einzelfallsensationen diverser Forschergruppen.

So umstritten sie auch sein mag – die Forschung an menschlichen embryonalen wie auch adulten Stammzellen bleibt einer der vielversprechendsten Wege in der Medizin des 21. Jahrhunderts. Denn wenn es gelingt, regenerative Zellen zur Reparatur von Geweben und Organen zu züchten, könnte dies für Millionen schwer kranker Menschen zu einer echten Heilungschance werden. Weltweit befassen sich inzwischen etliche Forscherteams mit der Stammzelltechnologie und versuchen dabei fieberhaft, der Natur ein Geheimnis des Lebens abzuringen: die Gesetze der Zellentwicklung von der einfachen befruchteten Eizelle zu den vielfältigen Gewebetypen eines Organismus. Denn genau das ist Voraussetzung, um gezielt neue Therapien entwickeln zu können. Eben solchen Forschungszwecken dient der Import humaner Stammzellen, den das Robert Koch-Institut bis Anfang April 2003 drei deutschen Arbeitsgruppen erlaubt hat – darunter uns am Neurophysiologischen Institut der Universität zu Köln.

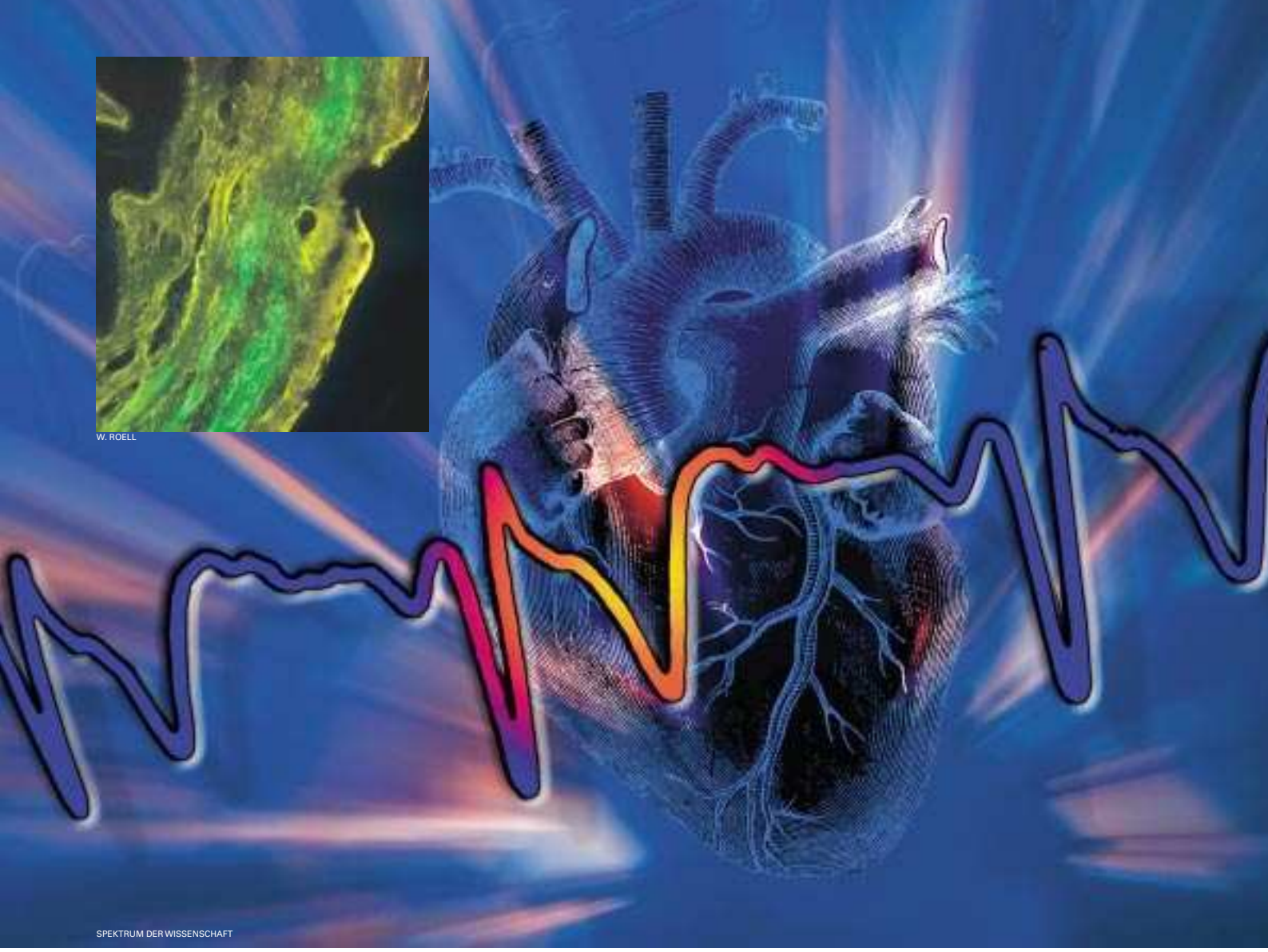
Doch was genau versteht man unter diesen embryonalen Stammzellen, die zur Züchtung von Geweben gedacht sind? Werden hierfür tatsächlich Embryonen aus einer künstlichen Befruchtung abgetötet, aus denen eigentlich ein neuer Mensch entstanden wäre? In unseren Augen ist diese oftmals kritisierte Embryonentötung eine recht fragwürdige Formulierung, denn allein die Definition des Begriffes Embryo führt zu großen Missverständnissen, welche die Gefühle immer wieder hochkochen lassen.

Mediziner bezeichnen nämlich den gesamten Zeitraum von der Befruchtung einer menschlichen Eizelle bis zum Ende der achten Entwicklungswoche als Embryonalstadium. Während nun aber ein Embryo am Ende dieses Zeitraums bereits deutliche Körperformen hat, geht es bei der Stammzellforschung um ein viel früheres Stadium: die so genannte Blastocyste. Der »Bläschenkeim«, so der deutsche Begriff dafür, ist ein Aggregat aus rund hundert Zellen, das etwa am 3. bis 4. Tag nach der Befruchtung vorliegt – also noch vor dem Einnisten in die Gebärmutter, das erst am 5. bis 6. Tag stattfindet. Einzig und allein danach liefe die Entwicklung überhaupt weiter. Nistet sich der winzige Zellball nicht ein, so geht er mit dem normalen Menstruationsblut ab – was nicht etwa die Ausnahme, sondern die Regel ist. Denn immerhin geschieht das bei ungefähr siebzig Prozent aller befruchteten Eizellen. (Hinzu kommen in Deutschland pro Jahr noch etwa eine Million Blastocysten, die durch Verhütungsmittel wie die »Spirale« und die »Pille danach« zu Grunde gehen.)

Die für die Forschung so bedeutsamen »embryonalen« Stammzellen werden also aus winzigen »Zellklümpchen« gewonnen, die noch keinen Kontakt zum mütterlichen Gewebe hatten und sich von alleine nie weiterentwickeln könnten, und nicht, wie man irrtümlich annehmen könnte, einem Embryo mit beginnenden menschlichen Zügen. Es er-

IN KÜRZE

- **Embryonale Stammzellen** sind theoretisch nahezu Alleskönner. Bringt man sie in ihr natürliches Umfeld, ein Keimbläschen, beteiligen sie sich an der Entwicklung aller Gewebe. Einen kompletten Organismus können sie allein jedoch nicht hervorbringen.
- Sie besitzen ein enormes **medizinisches Potenzial**. Bei Mäusen konnten Forscher Schäden an Herz, Bauchspeicheldrüse oder Nervensystem mit Ersatzzellen teilweise mindern.
- Sie können aber auch, unsachgemäß angewendet, **Tumoren** erzeugen. Ohne gründliche Forschungen an tierischen wie menschlichen embryonalen Stammzellen ist daher das Potenzial samt seinen Gefahren nicht auszuloten.



W. ROELL

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Bei der Maus ist eine Herzreparatur schon gelungen. An einem künstlich gesetzten Infarkt haben sich Herzvorläuferzellen (grün fluoreszierend im kleinen Foto) integriert, die aus embryonalen Stammzellen gezüchtet wurden. Nach dem Ausreifen unterstützen sie das Organ beim Pumpen.

scheint uns sehr wichtig, diesen Unterschied klar herauszustellen.

Nicht alle Zellen des Bläschenkeims sind Quelle embryonaler Stammzellen. Wird eine Eizelle befruchtet, was in der Regel im oberen Abschnitt eines Eileiters geschieht, teilt sie sich auf ihrem weiteren Weg zur Gebärmutter mehrmals, ohne dabei an Größe zu gewinnen. Bei einem Umfang von 16 Zellen sieht der Keim dann wie eine kleine Maulbeere aus. Bis dahin besitzen nach heutigen Erkenntnissen – und in Analogie zu anderen Säugetieren – wahrscheinlich manche dieser 16 Zellen noch so genannte Totipotenz, also die theoretische Fähigkeit, einen ganzen Organismus neu zu bilden. Ab der nächsten Teilung, dem 32-Zell-Stadium, beginnt Flüssigkeit einzuwandern und eine Höhle im Keim aufzuweiten. Diese Zellen am äußeren Rand bilden später Teile der Plazenta; nur die innere Zellmasse, der Embryonalknoten, enthält nunmehr die embryonalen Stammzellen. In diesem Stadium haben alle vorhandenen Zellen definitiv ihre ehemalige Allmacht eingebüßt und sind nun nur noch »pluripotent«. Damit wird die prinzipielle Fähigkeit von Stammzellen bezeichnet, sich in praktisch jedes der etwa 200 unterschiedlichen Gewebe des Körpers entwickeln zu können: also in Muskeln, Nerven, Schleimhaut, Knorpel oder Blutzellen, vor allem aber auch in Geschlechtszellen, durch die sich der Lebenskreis wieder schließen kann.

Tumoren als Quelle

Weit früher als die Forschung an menschlichen pluripotenten Stammzellen begann die Arbeit mit solchen aus Tieren – nämlich bereits in den 1970er Jahren. Damals isolierten Wissenschaftler erstmals geeignete Zellen, allerdings aus Teratokarzinomen der Maus. Das sind bösartige Tumoren der Keimdrüsen; sie bestehen aus verschieden weit differenzierten Zellen unterschiedlicher Gewebetypen, enthalten aber auch undifferenzierte, noch embryonale Zellen. Verpflanzt man diese in immunschwache Mäuse, entstehen wieder Teratokarzinome. Ungewöhnlich verhalten sich aber die embryonalen Karzinomzellen, nach der englischen Bezeichnung *embryonic carcinoma cells* auch kurz EC-Zellen genannt, in einer geeigneten Nährlösung. Darin teilen sie sich unbegrenzt, ohne dabei irgendeinen Differenzierungsweg einzuschlagen. Ihre Entwicklung bleibt, solange man fördernde Signale verhindert, sozusagen auf frühester Stufe »eingefroren«. Diese theoretisch unbegrenzte Vermehrbarkeit kennzeichnet auch viele andere Stammzelltypen. Sie ist eine entscheidende ▷

▷ Eigenschaft zur Gewinnung ausreichender Mengen von transplantationsfähigem Material – nur möchte man natürlich keine Tumoren erzeugen.

Hier kam den Wissenschaftlern eine verblüffende Entdeckung zu Hilfe. Als die gleichen embryonalen Karzinomzellen in eine Mäuse-Blastocyste transferiert wurden, verhielten sie sich normal und beteiligten sich am Aufbau vieler verschiedener Gewebetypen, einschließlich neuer Geschlechtszellen. Anders gesagt: EC-Zellen erwiesen sich als pluripotent. Die Wissenschaftler hatten die Zellen jeweils in den inneren Knoten isolierter Blastocysten injiziert und diese dann in die Gebärmutter einer anderen, scheinschwangeren Maus übertragen. Was daraus als Nachwuchs hervorging, waren »Mischlingskinder« aus den Zellen der inneren Zellmasse und den injizierten EC-Zellen. Man sprach daher von »Mosaikmäusen« oder »chimären« Mäusen. Da EC-Zellen auch wieder Urkeimzellen – Vorläufer späterer Geschlechtszellen – hervorbringen, ließen sich durch geschicktes Kreuzen von Mosaikmäusen Nachkommen züchten, die ausschließlich die Erbinformation der EC-Zellen tragen.

Ausgehend von diesen Experimenten entwickelten verschiedene Forschergruppen übrigens die Technik, Mäuse zum Studium diverser Krankheiten gezielt genetisch zu manipulieren. Mit Hilfe solcher Tiere lässt sich untersuchen, welche Aufgaben bestimmte Gene haben, genauer: wie sich deren Verlust, Hinzufügen oder Verändern bemerkbar macht.

Während der Arbeit mit den chimären Mäusen zeigte sich aber auch zusehends, welches enorme Entwicklungspotenzial in pluripotenten Stammzellen steckt. Durch die unbegrenzte Teilungsfähigkeit der EC-Zellen und ihre Eigenschaft, sich in die unterschiedlichsten Gewebetypen differenzieren zu können, war nun ein Ausgangsmaterial zur Hand, das sich mit geeigneten Methoden – die man allerdings noch nicht kannte – prinzipiell in jede gewünschte Zellart überführen ließ. Wissenschaftler begannen daher intensiv, die physiologischen, pharmakologischen und biochemischen Eigenschaften dieser Stammzellen zu erforschen. Zum einen ging es ihnen um ein besseres Verständnis der Zelldifferenzierung, und zum anderen darum, wie potenzielle medikamentöse Substanzen die Zellen in der Kulturschale und damit im Embryo womöglich schädigten.

Aber gerade durch diese detaillierten Untersuchungen wurde auch klar, dass sich die EC-Zellen in einigen ihrer Grundeigenschaften von denen des Embryonalknotens unterschieden – hatten sie doch als entartete Zelltypen einige genetische Veränderungen erfahren. Die zunehmende Kritik an den EC-Zellen führte zur Suche nach anderen, besser geeigneten Stammzelltypen. Man fand sie zunächst bei Tieren, 1998 auch beim Menschen, in zwei verschiedenen Quellen: zum einen in fetalen Vorläuferstadien späterer Ei- und Samenzellen, und zum anderen in den embryonalen Stammzellen, eben Zellen aus der inneren Masse einer Blastocyste.

Restaurierung des Körpers aus eigener Kraft?

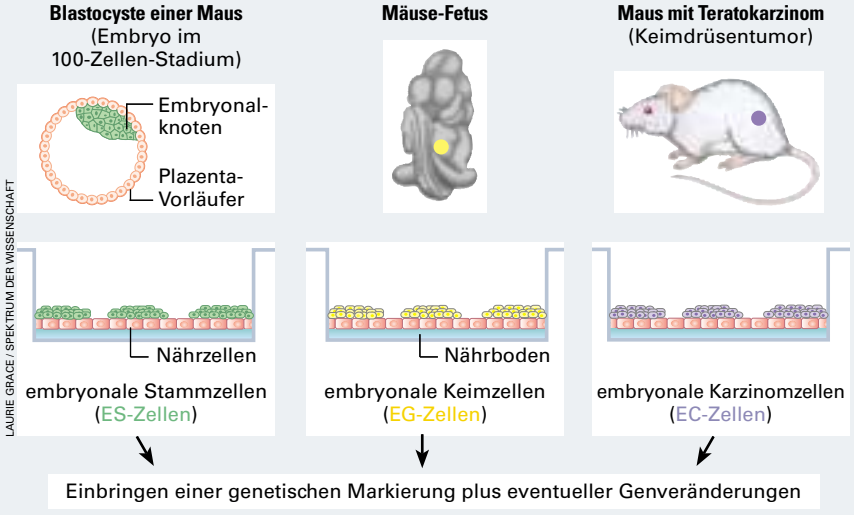
Neben diesen embryonalen stellen aber auch adulte, sozusagen reifere Stammzellen ein wichtiges Forschungsfeld dar. Auf dem Weg von der Blastocyste zum erwachsenen Organismus differenzieren sich die Zellen unter dem Einfluss von Wachstumsfaktoren, Hormonen, Proteinen und anderen Faktoren immer weiter. An einem bestimmten Punkt dieser Entwicklung bleiben nun bei manchen Geweben einige Zellen quasi auf Zwischenstufen stehen – wahrscheinlich um als eine Art »Reparaturpool« oder gewebliche »Lagerhalle« als Nachschublieferant für gealterte Zellen zur Verfügung zu stehen. Bei Blutzellen, die fortwährend erneuert werden müssen – die Lebensdauer eines roten Blutkörperchens beispielsweise beträgt etwa 120 Tage –, ist dies schon recht gut erforscht.

In genau diesem Reparaturpool liegt die Hoffnung verschiedener Forscher: Sie suchen nach adulten Stammzellen, die möglichst ähnliche Eigenschaften wie die embryonalen aufweisen sollen. Bei der Therapie bestimmter Blutkrebsarten etwa werden bereits seit längerer Zeit adulte Stammzellen aus dem Blut bildenden Knochenmark eines Spenders erfolgreich genutzt: Es ersetzt das entartete Knochenmark des Patienten, das durch aggressive Chemotherapien und Bestrahlung zuvor zerstört wird.

In der aktuellen Diskussion wird häufig darauf verwiesen, dass sich die künftige Forschung statt auf embryonale ausschließlich auf adulte Stammzellen konzentrieren sollte, da hier keine ethi-

Quellen tierischer Stammzellen

So genannte pluripotente Stammzellen mit der Fähigkeit, noch alle Gewebe, aber keinen Organismus zu bilden, lassen sich nicht nur aus einem Keimbläschen, einem Embryo im 100-Zellen-Stadium, gewinnen (links). Die künftigen Geschlechtszellen aus einem Mäuse-Fetus (Mitte) besitzen dieses Potenzial ebenso wie embryonal gebliebene Karzinomzellen eines Keimdrüsentumors (rechts). Die Kürzel der verschiedenen »embryonalen« Zellen leiten sich jeweils von den englischen Begriffen ab. Damit die Zellen bei Experimenten zu verfolgen sind, bekommen sie oft einen Genschalter sowie das Gen für ein fluoreszierendes Quallenprotein eingebaut.



LAURIE GRACE / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

schen Bedenken bestehen. Leider gibt es aber noch zu wenig Hinweise darauf, dass auch die adulten Stammzellen beliebig viele andere Gewebearten bilden können, außer solchen, für die sie normalerweise zur Verfügung stehen. Darüber hinaus ist auch noch nicht klar, wie die Zellen für ihre neuen Aufgaben »umprogrammiert« werden müssen und wie man sicherstellen kann, dass diese Um- oder Rückprogrammierung des Erbgutes kontrollierbar wird und auch bleibt. Möglicherweise entarten »embryonalisierte« adulte Zellen leichter. Ein weiteres Manko der adulten Stammzellen ist ihre – im Vergleich zu embryonalen Stammzellen – wesentlich geringere Teilungsrate.

Andererseits verfügen die adulten gegenüber den embryonalen Stammzellen auch über einen entscheidenden Vorteil: Sie lösen – sofern sie aus dem Patienten selbst stammen – keine Abstoßungsreaktion aus, da in diesem Falle Spender und Empfänger identisch sind. Bei embryonalen Stammzellen wäre das nur über den sehr problematischen Umweg des therapeutischen Klonens zu erreichen.

Adulte Stammzellen müssen also parallel zu embryonalen erforscht werden, können diese aber nicht ersetzen. Denn um die überaus komplexen Details der Zelldifferenzierung zu verstehen, sind schlichtweg Erkenntnisse aus beiden Zellsystemen vonnöten.

Schließlich sollten – als dritter Reparaturpool – auch Stammzellen aus Nabelschnurblut erwähnt werden, die zwischen den embryonalen und den adulten anzusiedeln sind. Derzeit werden bereits regelrechte Nabelschnurbanken angelegt, in der Hoffnung, dass damit künftig den jeweiligen Kindern körpereigenes Spendermaterial zur Verfügung steht. Bislang lässt sich so Blut bildendes Knochenmark ersetzen, aber noch kein weiteres Gewebe. In welchem Ausmaß sich diese Nabelschnurzellen einmal zur Reparatur anderer Gewebe verwenden lassen, ist noch ebenso unklar wie bei adulten Stammzellen.

Stammzellen beweisen ihre Pluripotenz, wenn man sie einem intakten Keimbläschen injiziert (Foto); sie wirken dann am Aufbau aller Gewebe des künftigen Tieres mit (Grafik).

Wir haben uns schon vor über zehn Jahren für die Arbeit mit tierischen embryonalen Stammzellen entschieden, da ihre Vorteile für die Forschung auf der Hand liegen. Die Erkenntnisse darüber versprachen zudem den größten konkreten Nutzen.

Für die Gewinnung tierischer embryonaler Stammzellen entnimmt man einer Blastocyste ihre innere Zellmasse und transferiert sie gewöhnlich in vorbereitete Kulturschalen, die mit einer Lage ernährender Bindegewebszellen beschichtet und einer speziell zusammengesetzten Nährlösung gefüllt sind. Hier vermehren sich die Stammzellen: Es entstehen zahlreiche rundliche Nester von etwa hundert Zellen, von denen einzelne wiederum in neue Kulturschalen überführt werden und so fort. Man kann sie aber auch einfrieren und in flüssigem Stickstoff beliebig lange aufbewahren. Auf diese Weise ist es möglich, aus wenigen embryonalen Stammzellen Abermillionen weitere zu züchten, die allesamt gleich sind und die – noch wichtiger – ihre Pluripotenz beibehalten haben.

Dass sich die Stammzellen vermehren, ohne sich gleichzeitig weiterzuentwickeln, ist jedoch künstlich herbeigeführt: Die Bindegewebszellen geben als bedeutsame Substanz den so genannten Leukämie-Hemmfaktor (englisch ▷

FRANK ZIMMERMANN, ZENTRUM FÜR MOLEKULARE BIOLOGIE, HEIDELBERG

Beweis der Pluripotenz

LAURIE GRACE

Tiere enthalten mosaikartig verteilt Nachfahren der übertragenen fremden Zellen.

Durch Kreuzen entstehen auch Tiere, die nur das Erbgut der fremden Stammzellen tragen.

▷ *leukaemia inhibitory factor*, LIF) in das Nährmedium ab: Er verhindert die mögliche Differenzierung der embryonalen Stammzellen. Ohne diesen Hemmstoff bilden sich ansatzweise erste Gewebevorstufen aus, allerdings so ungeordnet und verschiedenartig, dass sie nicht weiter verwertbar sind.

Wie aber erreicht man nun eine gezielte Differenzierung der Zellen in einen gewünschten Gewebetyp? Wir beschäftigen uns bereits seit vielen Jahren mit dieser Frage. Angeregt durch unsere früheren Forschungsarbeiten zur elektrischen Signalleitung bei Herzzellen haben wir uns inzwischen auf deren Züchtung aus embryonalen Stammzellen spezialisiert – in der Hoffnung eines Tages durch Zelltransplantationen die Narben von Herzinfarkten beseitigen und neues Herzgewebe aufbauen zu können.

Prinzipiell bestehen mehrere Möglichkeiten, undifferenzierte pluripotente Stammzellen auf ihren »Weg des Lebens« zu schicken, sie also zu einer selbstständigen Entwicklung von Gewebe anzuregen. Den meisten Erfolg verspricht offenbar die Differenzierung der Stammzellen mit der Methode des »hängenden Tropfens« in Kulturschalen. Entwickelt hatte das Grundprinzip Anna Wobus am Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung in Gatersleben (IPK). Wir haben es dann verfeinert. Man entnimmt dazu etwa tausend undifferenzierte Zellen aus ihren Schalen und transferiert sie in einen kleinen Tropfen Nährlösung, der an der Innenseite des Deckels einer neuen Schale haftet. Nachdem viele solcher Tropfen beschickt sind, dreht man den Deckel einfach um, sodass die Tropfen jetzt nach unten hängen und die darin befindlichen Stammzellen sich aufgrund der Schwerkraft zu einem kugeligen Gebilde zusammenlagern. Derartige Zellaggregate erhielten einst den missverständlichen englischen Namen *embryoid body*, obwohl es sich hierbei in keiner Weise um ein »embryoähnliches Körperchen«, sondern lediglich um eine Zusammenlagerung embryonaler Stammzellen handelt, aus denen niemals ein ganzer Organismus entstehen kann.

In diesen Aggregaten treten die Zellen nun untereinander in Kontakt und schicken sich gegenseitig genau die Botenstoffe zu, die auch während der normalen Embryonalentwicklung zum Einsatz kommen. Die Zellen »kommunizieren« also rege miteinander und fangen schließlich an, sich über verschiedene Zwischenstufen in unterschiedliche Zelltypen zu entwickeln – so auch zu frühen Herzvorläuferzellen. Für uns Wissenschaftler ist es immer wieder ein faszinierender Moment, wenn wir im Mikroskop beobachten, wie manche Zellen auf einmal zu zucken anfangen und rhythmische Kontraktionen auszuführen beginnen. Sie bilden so erste Eigenschaften einer Pumpe für ein Kreislaufsystem aus, das sich parallel zu einem Gefäßnetz in den Aggregaten entwickelt.

Dürfen die Zellen nun ohne weiteres Zutun wachsen, entstehen natürlicherweise nach und nach verschiedene Zelltypen, aber eben nicht so geordnet wie im Embryo. Wie aber gelingt es nun, beispielsweise ausschließlich Herzzellen zu züchten – dazu noch in so großen Men-

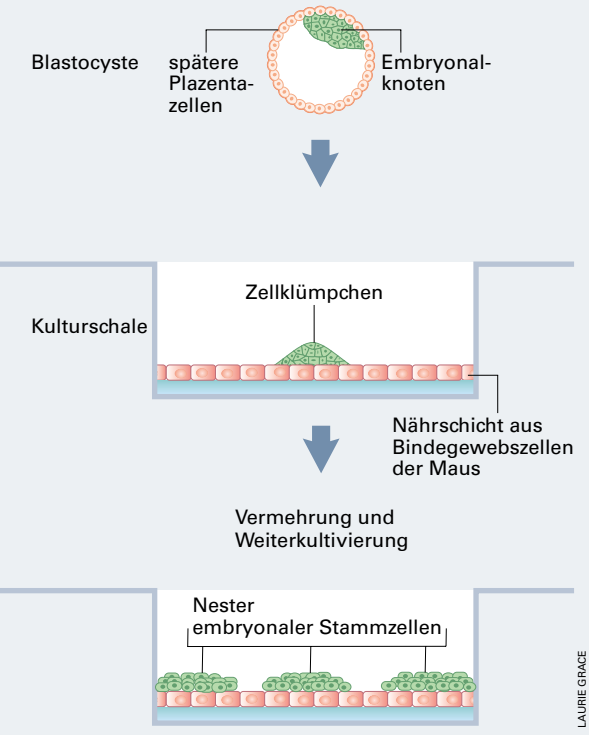
DAS STAMMZELLGESETZ

Am 25. April 2002 beschloss der Bundestag das »Gesetz zur **Sicherstellung des Embryonenschutzes** im Zusammenhang mit Einfuhr und Verwendung menschlicher embryonaler Stammzellen«. Es verbietet die Gewinnung von Stammzellen in Deutschland, erlaubt aber die Einfuhr unter bestimmten Bedingungen:

- Die Zell-Linien müssen schon vor dem 1.1. 2002 bestanden haben.
- Sie dürfen **nur Forschungszwecken** dienen, die hochrangig und auf anderem Wege voraussichtlich nicht zu erreichen sind.
- Die Ei- und Samenspender dürfen für das Überlassen der Keimbläschen in keiner Weise einen geldwerten Vorteil erlangt haben.
- Jede Einfuhr muss vom **Robert Koch-Institut** genehmigt werden.

Gordischer Knoten

Gewonnen werden ES-Zellen aus dem Embryonalknoten, der inneren Zellmasse eines Keimbläschens. Auf einer Nährschicht von Bindegewebszellen wachsen regelrechte Nester dieser Stammzellen heran, die sich beliebig weitervermehren und tiefgefroren aufbewahren lassen.



YORGOS NIKAS, HAMMERSMITH HOSPITAL, LONDON

Blick auf den Embryonalknoten (innen)

M. FELD

Kulturplatte mit punktförmigen Nestern von Stammzellen

J. HESCHELER

Ovale Nester von Stammzellen zwischen Nährzellen unter dem Mikroskop

gen, wie man für eine spätere Transplantation benötigen würde. Um dies zu erreichen, greifen wir in unsere molekularbiologische Trickkiste: Zunächst machen wir die Herzzellen »sichtbar«, indem wir das Gen für das grün fluoreszierende Protein (GFP) aus der atlantischen Qualle *Aequoria victoria* in das Erbgut der Stammzellen einschleusen. Das GFP-Gen koppeln wir vorher an ein genetisches Schaltelement des Alpha-Actins: Dieses Protein wird ausschließlich in Herzzellen ausgeprägt. Immer, wenn eine Zelle nun Alpha-Actin produziert, sich also zu einer Vorläuferzelle des Herzens entwickelt, stellt sie auch das Fluoreszenzprotein her. Unter UV-Licht verrät sie sich im Fluoreszenzmikroskop an ihrem grünlichen Leuchten. Auf diese Weise können wir die entstehenden Herzzellen leicht erkennen.

Wenn das Herz grünlich fluoresziert

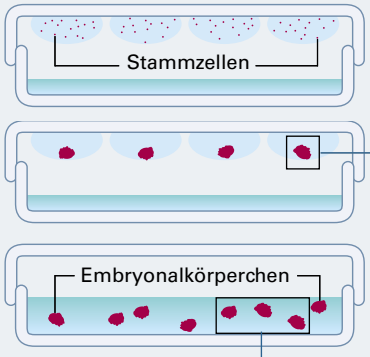
Um nun die Zahl der begehrten Zellen gegenüber den anderen Typen um ein Vielfaches zu steigern, benutzen wir einen zweiten Trick. Wir koppeln an die bereits vorhandenen Gene für Alpha-Actin und GFP noch ein weiteres, das diesmal die Zellen resistent gegenüber einem bestimmten Antibiotikum macht. Gibt man das Mittel in die Nährlösung der Aggregate, sterben alle Zellen darin ab – außer den Herzzellen, denen es ja nichts anhaben kann. Die so »aussortierten« Zellen teilen sich dann ungestört weiter, und wir erhalten schließlich fast nur Herzzellen – die auch noch grün leuchten, wodurch sie später nach einer Transplantation leicht wieder aufzufinden sind.

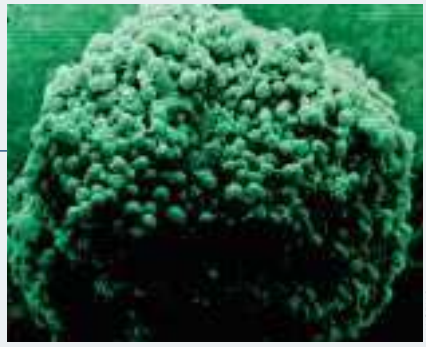
Derzeit erproben wir unsere Methode an Mäusen, bei denen wir künstlich einen Herzinfarkt auslösen. Dies geschieht unter Leitung von Bernd Fleischmann aus unserem Kölner Institut sowie durch Willi Röll und Achim Welz von der Klinik für Herzchirurgie der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Die Tiere werden in einer speziell angefertigten Narkoseeinheit betäubt. Dann öffnet ihnen einer der beiden Herzchirurgen fachmännisch den Brustkorb. Auf das freigelegte Herz wird an einer kleinen Stelle eine tiefgekühlte Kupferstange aufgesetzt. Das Gewebe gefriert kurzfristig und wird dadurch wie bei einem Infarkt funktionsuntüchtig. Direkt danach spritzen wir etwa einhunderttausend »grün leuchtende« Herzvorläuferzellen, die wir aus embryonalen Stammzellen gezüchtet haben, in die gerade entstandene Schadstelle ein und verschließen den Brustkorb wieder. Nach einigen Minuten erwacht die Maus aus ihrer Narkose und rennt in der Regel wieder normal umher.

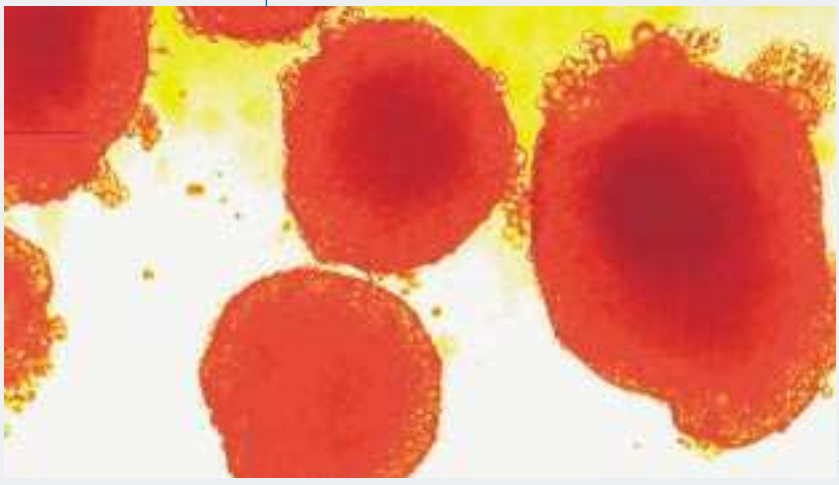
Etwa zwei Wochen später nehmen wir das Herz der Maus »unter die Lupe« oder besser gesagt unter das Fluoreszenzmikroskop – auf der Suche nach markierten Zellen. Auf diese Weise wollen wir die alles entscheidende Frage beantworten, ob die von uns gezüchteten Herzvorläuferzellen es geschafft haben, sich in funktionierendes Herzmuskelge- ▷

Kultur im hängenden Tropfen

Damit Stammzellen sich zu Gewebevorläufern weiterentwickeln, überführen Forscher sie in Tröpfchen Nährflüssigkeit am Deckel einer Kulturschale (oberes Foto). Infolge der Schwerkraft sammeln sich die Zellen am Grund und bilden so genannte Embryonalkörperchen aus (kolorierte Elektronenmikroskop-Aufnahme, Mitte). Sie werden abgefischt und frei in Nährflüssigkeit weitergezüchtet (Mikroskop-Aufnahme, unten). In den Embryonalkörperchen würde ein ungeordneter Mischmasch von Gewebevorläufern entstehen; daher bekommen die Stammzellen vorher ein Genkonstrukt eingebaut, das in Gegenwart eines Antibiotikums fast nur Zellen des gewünschten Gewebetyps überleben lässt.







▷ webe umzuwandeln. Und tatsächlich: In neunzig Prozent der Fälle sind im Fluoreszenzmikroskop grün leuchtende Areale zu erkennen, wo vorher nur eine Narbe aus funktionslosem, derbem Bindegewebe war! Die Zellen haben sich in rhythmisch kontrahierende reife Herzmuskelzellen verwandelt, die nach unseren Untersuchungen das kranke Organ dabei unterstützen, sich zu erholen.

Neue Power

Unserer Arbeitsgruppe ist es also gelungen, Teile einer Herzinfarktnarbe durch gezielt differenzierte embryonale Stammzellen zu ersetzen. Wir haben zudem mit unseren Experimenten bewiesen, dass sich die neuen Herzzellen funktionell an das bereits vorhandene Herzmuskelgewebe ankoppeln, sich in den Gewebeverband integrieren und einen signifikanten Kraftzuwachs im Herzen erreichen – zumindest bei Mäusen. Es besteht also berechtigte Hoffnung für die Entwicklung neuer Therapien. Trotzdem werden noch mehrere Jahre vergehen, bis wir eventuell in der Lage sind, die Narben eines Herzinfarktes auch beim Menschen mithilfe von Stammzellen zu heilen. Denn wir müssen unsere Methode noch in vielen Versuchen aufs Genaueste prüfen. Eine israelische Forschergruppe in Haifa hat die in Köln entwickelte Technik bereits ein Stück weitergeführt und auf humane embryonale Stammzellen übertragen. Den Wissenschaftlern dort ist es gelungen, mit unseren Methoden menschliche Herzvorläuferzellen zu gewinnen. Der eine oder andere Schritt auf dem langen Weg von der Kultur embryonaler Stammzellen zur Therapie ist also schon geschafft, während andere Hürden noch genommen werden müssen.

Als Erstes ist ganz genau zu untersuchen, wie gut sich eine transplantierte Zelle in das Wirtsgewebe einfügt und dort ihre physiologische Funktion aufnimmt. Am Beispiel des Herzens bedeutet dies: Es genügt nicht, dass die transplantierte Zelle zur rhythmischen Kontraktion fähig ist – sie darf auch keine Herzrhythmusstörung auslösen. Ein zweiter, ganz entscheidender Aspekt gilt der Sicherheit: Wir müssen ausschließen können, dass das transplantierte Material ein Teratokarzinom bildet. Das passiert auch bei normalen ES-, nicht nur bei EC-Zellen. Dazu müssen wir die Antibiotika-Selektion bei der Anzucht der Herzmuskelvorläufer weiter verfeinern, damit keine undifferenzierten Zellen in den Körper gelangen.

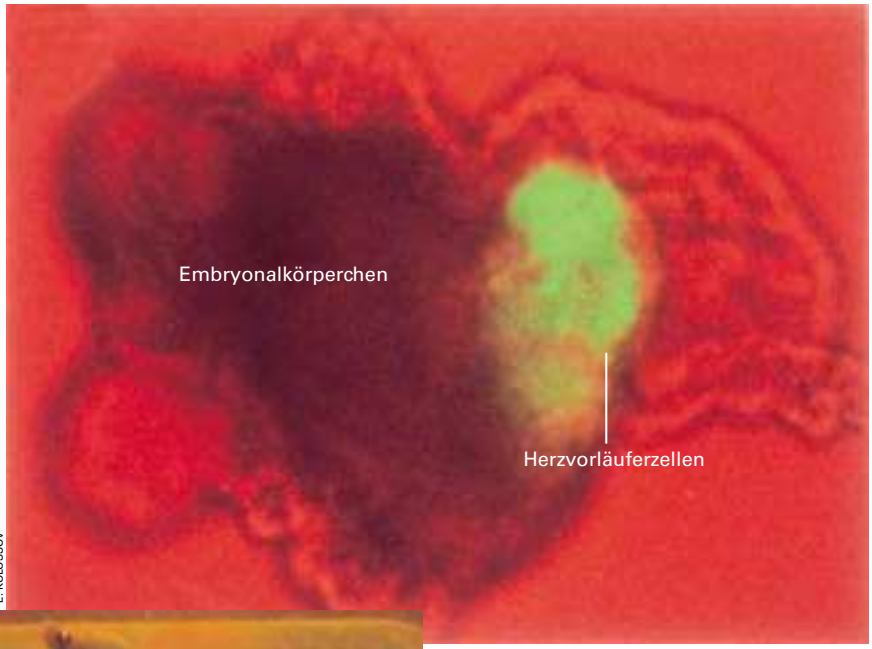
Der dritte, genauer zu untersuchende Punkt betrifft das Risiko einer Abstoßungsreaktion – die transplantierte Zelle darf nicht vom Wirtsorganismus als fremd erkannt und abgewehrt werden. Darin steckt wohl das größte Problem, und die beste Lösung wäre vermutlich, eine Bank von etwa 200 verschiedenen Stammzell-Linien anzulegen, die den wichtigsten unterschiedlichen Immunitätstypen des Menschen entsprechen. Ähnliche Banken existieren bereits für die Knochenmarkstransplantation. Noch wissen wir aber nicht, ob diese menschlichen Linien auf Dauer vital bleiben oder ob sie altern und dann in Abständen durch neue ersetzt werden müssen. Die in Köln benutzten embryonalen Mäuse-Stammzellen jedenfalls gedeihen seit immerhin 18 Jahren gut.

Ein anderer möglicher Weg zur Vermeidung von Abstoßungsreaktionen ist das so genannte therapeutische Klonen. Dabei würde man den Zellkern einer Patientenzelle in eine entkernte Eizelle übertragen, aus der sich wiederum eine Blastocyste entwickeln kann. Aus deren innerer Zellmasse könnte dann eine embryonale Stammzell-Linie mit den individuellen Merkmalen des jeweiligen Patienten gezüchtet werden. Nicht nur hier gibt es freilich viele Wenn und Aber.

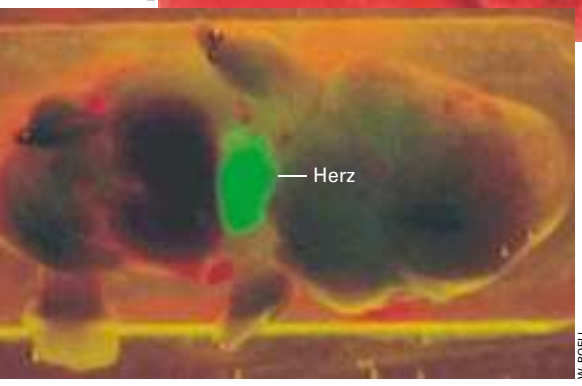
Noch zehn bis zwanzig Jahre bis zur Therapie

Theoretisch lassen sich humane embryonale Stammzellen, ob körperidentisch oder nicht, in über 200 verschiedene Gewebearten differenzieren. Die Hauptschwierigkeit liegt nun darin, die individuellen Bedingungen, Einflüsse und Faktoren zu entschlüsseln, die eine embryonale Stammzelle zu einer Herz-, Nerven-, Haut- oder Knorpelzelle werden lassen. Außerdem ist es noch sehr schwierig, eine ausreichend hohe Zahl der gewünschten reiferen Zellen zu erhalten.

Bei einigen Krankheiten scheinen die Wissenschaftler aber bereits auf dem besten Wege zu sein, neue, auf embryonalen Stammzellen basierende Therapien zu entwickeln. Die betroffenen Organe

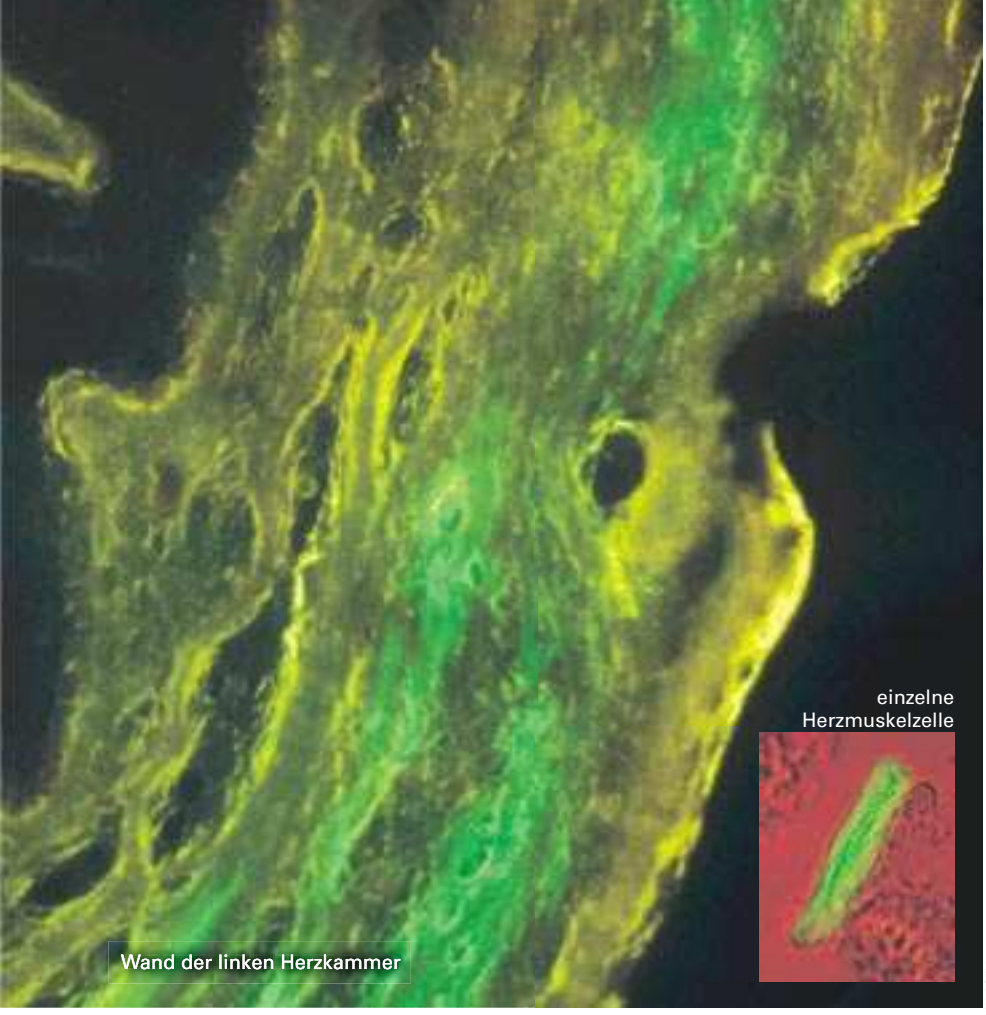


E. KOLOSSOV



W. ROELL

Die ursprünglichen Stammzellen bekamen unter anderem das Leucht-Gen einer Qualle eingebaut, versehen mit einem Genschalter, der nur in Vorläuferzellen des Herzens anspringt. Diese Zellen fluoreszieren unter UV-Licht grünlich, oben in einem Embryonalkörperchen, links in einem Mäuse-Embryo.



W. ROELL

Grün ist die Hoffnung: An der Stelle eines künstlichen Herzinfarkts haben sich injizierte Vorläuferzellen des Herzmuskels in reife Zellen (leuchtend grün, Ausschnitt) umgewandelt, in das Gewebe integriert und die Arbeit aufgenommen. Sie pumpen mit und lassen die behandelten Tiere länger überleben. Beim Menschen wurden solche Vorläuferzellen gezüchtet, müssen aber vor einem Einsatz erst noch genau geprüft werden, unter anderem auf Wirksamkeit und Sicherheit.

oder Gewebe gehören meist zu Systemen, die ihren hohen Spezialisierungsgrad mit dem fast völligen Verlust der Regenerationsfähigkeit bezahlt haben: neben dem Herzen beispielsweise auch das Nervensystem, der Gelenkknorpel und das Hormonsystem.

Im Bereich der Nervenerkrankungen gibt es bereits viel versprechende Ergebnisse – so etwa bei der multiplen Sklerose, bei der die Isolationsschicht der Nervenfasern defekt ist. Die Folgen sind vergleichbar mit einem technischen Kabelbrand. Wissenschaftler, darunter Oliver Brüstle von der Universität Bonn, versuchen nun, mithilfe der embryonalen Stammzellen die defekten Isolierungen zu regenerieren. Ähnliche Ansätze gibt es für die Behandlung anderer schwer wiegender neurologischer degenerativer Erkrankungen wie dem Morbus Parkinson.

Auch die Arthrose, ein Verschleiß von Knorpelsubstanz, der bei Millionen meist älterer Menschen zu dauerhaft schmerzenden Gelenkveränderungen führt, ist ein Kandidat für die Stammzelltherapie. In diesem Fall liegt das Ziel in der Differenzierung embryonaler Stammzellen zu Knorpelzellen, die dann die verbrauchten Gelenkinnenflächen ersetzen sollen.

Schließlich könnten bei einer bestimmten Form der Zuckerkrankheit, die vorwiegend junge Menschen betrifft und bei der alle Insulin produzierenden Inselzellen der Bauchspeicheldrüse defekt sind, embryonale Stammzellen eine Lösung bieten. Die Transplantation von neuem Insulin produzierendem Gewebe würde den oft noch jugendlichen Patienten die Bürde nehmen, sich ihr Leben lang mehrmals täglich Insulin unter die Haut spritzen müssen.

Die bisherigen Erkenntnisse sind faszinierend und viel versprechend zugleich. Doch es ist noch zu früh, konkrete Aussagen über mögliche Therapien zu machen. Auch ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorhersagbar, ob in Zukunft embryonale oder adulte Stammzellen die geeignete therapeutische Basis sein werden. Denn wir beginnen gerade erst die fundamentalen Mechanismen zu verstehen, wie sich eine Eizelle letztlich zu einem Organismus mit seinen mannigfachen Gewebetypen entwickelt. Die Erforschung all jener komplizierten Stoffwechselwege, Zellsignale sowie deren hochgradig vernetzter Wechselwirkungen setzt ein enormes wissenschaftliches Potenzial voraus, das nur durch intensive Förderung der Forschung an allen Stammzellarten ausgebaut werden kann. Wir brauchen noch weit mehr Erkenntnisse über beide Zellklassen, um zu verstehen, wie die Vielfalt verschiedener Gewebe entsteht und wie sich diese möglicherweise im Labor züchten lassen.

Bis die neue Technologie tatsächlich zum Einsatz kommen kann, werden noch etwa zehn bis zwanzig Jahre vergehen – ein Zeitraum, in dem die Forschung auf Unterstützung angewiesen ist: unter anderem aus der Öffentlichkeit, die dafür von den Forschern verständlich informiert und aufgeklärt werden muss. Denn auch wenn das Thema Stammzellforschung vom ethischen Standpunkt sehr kontrovers ist, sollten wir das Ziel, nämlich die Linderung oder sogar Heilung schwerer Leiden im Auge behalten – und nicht mehr allzu viel kostbare Zeit verlieren. ◁

Jürgen Hescheler, Direktor des Instituts für Neurophysiologie der Universität zu Köln, hat 1985 in Homburg/Saar in Medizin promoviert. Als erster Forscher hatte er physiologische Messungen an tierischen embryonalen Stammzellen durchgeführt sowie zahlreiche bedeutende Erkenntnisse auch zu klinisch relevanten Aspekten der Stammzellforschung erarbeitet. **Michael Feld** hat im Jahr 2000 in Köln in Medizin promoviert. Tätig ist er als Arzt und freier Wissenschaftsjournalist.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Humane Stammzellen. Perspektiven und Grenzen in der regenerativen Medizin. Herausgegeben vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Schattauer, Stuttgart, New York 2001.

Cellular Cardiomyoplasty Improves Survival after Myocardial Injury. Von Roell W. et al. in: Circulation, Bd. 105, S. 2433 (2002).

Generation of Cardiomyocytes from Embryonic Stem Cells. Experimental Studies. Von A. Sachinidis et al. in: Herz, Bd. 27, Nr. 7, S. 589 (2002).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER AUTOREN

Richtiges Sehen – eine optische Täuschung?

Das Auge unterliegt vielen optischen Trugschlüssen. In Konfliktsituationen interpretiert das Gehirn die Bilddaten offenbar nach ihrer Wahrscheinlichkeit – und irrt sich dann manchmal.

Von Dale Purves, R. Beau Lotto und Surajit Nundy

Auf unsere Augen verlassen wir uns offenbar nicht. Nur zu oft würde ein Physiker andere Helligkeiten, Farben oder räumliche Verhältnisse messen, als wir wahrzunehmen glauben. Und doch scheinen wir die Welt meist richtig zu sehen. Mit dieser Unstimmigkeit befasste sich schon der irische Philosoph und Theologe George Berkeley (1685–1753). In einer Schrift von 1709 (deutsch: »Versuch einer neuen Theorie der Gesichtswahrnehmung«) wies er auf, dass beispielsweise die Entfernung eines Objektes allein von seinem Bild auf der Netzhaut nicht herleitbar ist. Denn eine Linie kann dort genauso lang sein, wenn sie von einem kleinen nahen oder einem entfernteren großen Gegenstand herrührt.

Alles, was die Netzhaut an visueller Information erhält, ist in dieser Weise mehrdeutig, doch gewöhnlich merken wir das nicht einmal. Auch die Farbe eines Gegenstands kann, abhängig von Beleuchtung oder Umfeld, bei den Sehzellen völlig verfälscht eintreffen. Blau wird dann vielleicht zu Grau. Gleiches gilt für die Helligkeit: Statt Weiß empfängt die Netzhaut etwa Dunkelgrau. Wie aber können wir uns zurechtfinden, wenn die Beziehung zwischen der physikalischen Welt und unserer Wahrnehmung dieser Welt ihrem Wesen nach unbestimmt ist? Wieso wissen wir anscheinend trotzdem meistens genau, was wir sehen?

Biologisch gesehen ist die richtige Wahrnehmung der Gegenstände lebenswichtig. Schließlich hängt schon bei Tieren das Überleben davon ab, dass sie auf ihre Umwelt angemessen reagieren, Gefahren erkennen und sie richtig einschätzen. Sie müssen wissen, wie nah und wie groß das Objekt im Blickfeld wirklich ist, ob die Frucht eine reife Farbe hat oder ob im Schatten der Feind lauert. Wie verschaffen wir uns trotz der falschen Netzhautbilder die angemessene Information?

Weiß bleibt nicht weiß. Nur – warum erscheint die weiße Kachel, die unter dem Tisch im Schatten liegt, viel heller als die schwarze rechts neben dem Tischbein, auf die Licht fällt? Objektiv sind beide gleich grau.

Statistik bewährt sich

Anscheinend arbeitet das Sehsystem stets mit Erfahrungen, gelernten oder auch genetisch überlieferten. Wir sehen die Welt gar nicht wirklich so, wie sie die Netzhaut zeichnet. Wir sehen sie andererseits auch nicht physikalisch korrekt. Sondern wir nehmen ihre Abbilder als das wahr, was sich bisher im konkreten Leben am meisten bewährte.

Das heißt, wir analysieren die Bilder nicht nach physikalischen Kriterien, sondern das visuelle System stützt sich auf Erfahrungswahrscheinlichkeiten. Gewissermaßen nehmen wir die Umwelt so wahr, wie sie sich in Verhaltensreaktionen auf visuelle Reize als stimmig erwies. Immer mehr wissenschaftliche Ergebnisse besagen, dass unser Wahrnehmungssystem – wie auch das vieler Tiere – die ▷

▷ Unbestimmtheit der Netzhautbilder anscheinend in dieser Weise umgeht.

Diese Strategie lässt sich bei der Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden besonders gut demonstrieren. Hell und Dunkel gehören beim Sehen zu den elementaren Komponenten. Wir unterscheiden Helligkeitsgrade – doch nicht etwa entsprechend den physikalischen Intensitäten von Lichtreizen. Wenn nämlich zwei Oberflächen gleich viel Licht ins Auge reflektieren, können sie uns doch verschieden hell vorkommen – wenn ihr Umfeld verschieden hell ist. Wahrnehmungspsychologen nennen dieses Phänomen simultanen Helligkeitskontrast (oder Helligkeitssimultankontrast; siehe auch Kasten unten).

Diese Täuschung ist lange bekannt. In der Vergangenheit suchten Neurobiologen die Erklärung darin, dass Neuronen der Netzhaut, die ins Sehzentrum des Gehirns ziehen, bei einem grauen Fleck auf dunklem Grund heftiger feuern als bei dem gleichen grauen Fleck auf hellem Grund. Denn die Netzhaut arbeitet Konturen schärfer heraus, indem sie Kontraste überhöht. Neurophysiologen kennen dafür viele Beispiele.

Verschiedene Beobachtungen lassen jedoch vermuten, dass diese Deutung im Falle des simultanen Helligkeitskontrasts wohl nicht zutrifft. Denn beispielsweise wirken unter bestimmten Bedingungen gleich helle Flächen auch dann unterschiedlich, wenn ihr Umfeld ganz gleich ist. Und es gibt sogar Bedingungen, bei denen die eine Fläche trotz eines insgesamt helleren Umfeldes heller wirkt als die andere, die in einem insgesamt dunkleren Umfeld steht – gerade das Gegenteil also wie beim üblichen simultanen Helligkeitskontrast. Als Erster beschrieb diese Erscheinung der deutsche Physiker Wilhelm von Bezold (1837–1907).

Eine andere Erklärung des Phänomens, die Erfahrungen einbezieht, erscheint plausibler. Das visuelle System muss gewissermaßen berücksichtigen,

IN KÜRZE

▶ Die Bilder von der Welt, die sich beim Sehen auf der Netzhaut abbilden, sind sehr oft **mehrdeutig**. Sowohl Helligkeits- wie Farbwerte als auch geometrische Beziehungen können in der Realität ganz verschiedene Situationen bedeuten.

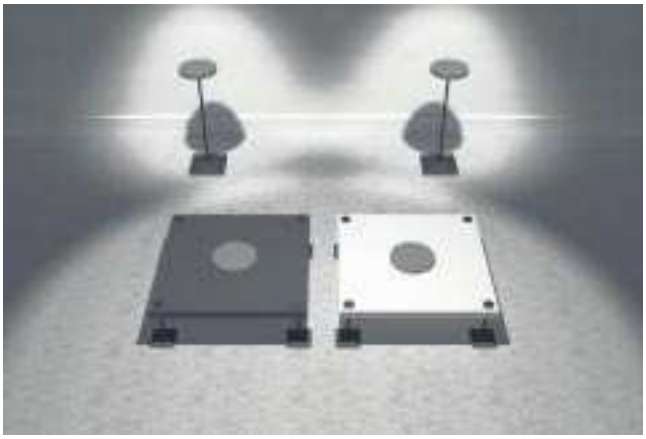
▶ **Das visuelle System** nimmt die Umwelt dennoch meist stimmig wahr. Wie es die empfangenen Bilder einschätzt, hängt von früheren stammesgeschichtlichen und individuellen **Erfahrungen** ab.

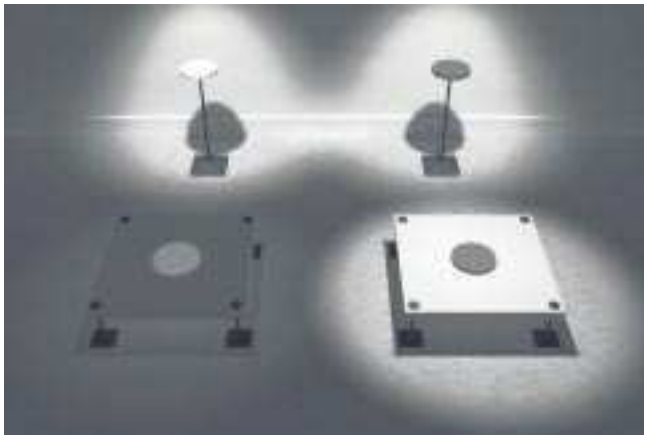
Der klassische Simultan-Helligkeitskontrast

Vermeintlicher Helligkeitsunterschied von Erfahrung geprägt

Von den beiden runden Scheiben wirkt die linke heller als die rechte (obere Bilder). Doch beide haben den gleichen Grauwert. Anscheinend berücksichtigt unser Wahrnehmungssystem, dass eine reflektierende Fläche bei wenig Licht dunkler wirkt als bei starker Beleuchtung.

Im Alltag bestehen zwei Möglichkeiten, um die Illusion zu erzeugen (Bilder unten). Entweder sind zwei gleich reflektierende Scheiben gleich stark beleuchtet (links unten). Oder sie haben unterschiedliche Reflexionseigenschaften – die eine ist unter gleicher Beleuchtung heller, die andere dunkler –, aber die an sich hellere Scheibe liegt im Schatten, die an sich dunklere im Licht (rechts unten).





AMERICAN SCIENTIST

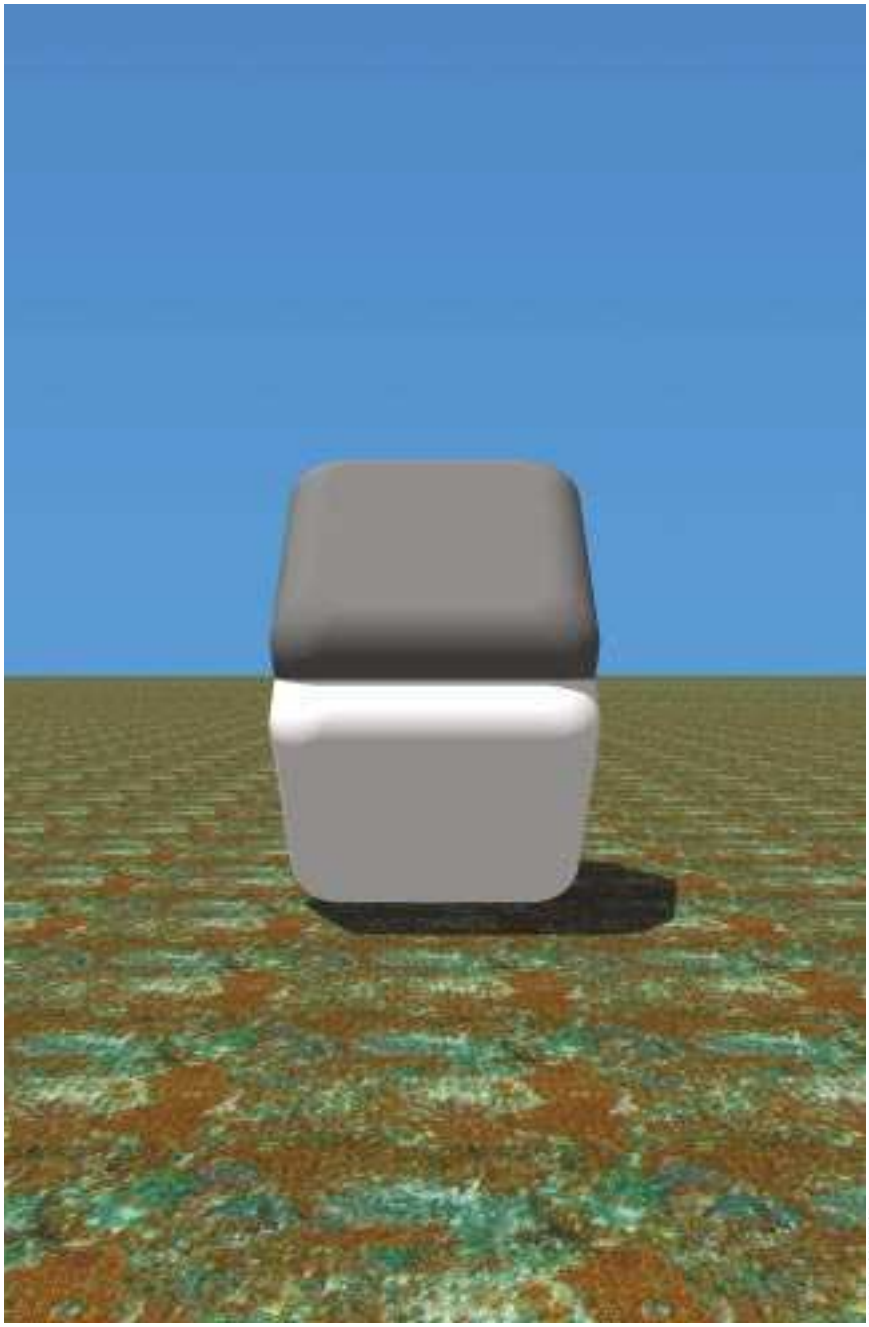
dass das gleiche Bild auf mehrere Weise entstehen kann. Zwei Flächen können gleich viel Licht reflektieren, also gleich hell wirken, wenn sie beide zum Beispiel weiß sind (besser gesagt: eine Oberfläche mit gleichen Reflexionseigenschaften haben) und dazu gleich angeleuchtet werden. Sie können aber auch nur auf der Netzhaut gleich hell erscheinen, obwohl ihre Oberflächen verschieden sind: Dann wäre die eine an sich dunkler als die andere, würde aber stärker angestrahlt; die andere wäre bei gleichem Licht heller, würde nun aber schwächer angestrahlt. Vereinfacht gesagt: Ein weißer Gegenstand kann im Dunklen für die Sehzellen grau wirken, ein schwarzer im Sonnenlicht ebenfalls.

Angenommen, unser visuelles System überspielt diese Unsicherheit der Wahrnehmung durch Erfahrung: Dann wird das Ergebnis eher in Richtung derjenigen Bewertung tendieren, die sich früher unter jeweils gleichen Umständen als gültig herausgestellt hatte. Identische Dinge müssen stets gleich aussehen, egal ob sie sich in der Sonne oder im Schatten befinden. Unterschiedliche Dinge sollten möglichst in jeder Umgebung auch unterschiedlich aussehen. Nur unter diesen Voraussetzungen kann man angemessen reagieren.

Reine Erfahrung: Feind bleibt Feind auch im Schatten

Im Fall des simultanen Helligkeitskontrasts sollten somit die früheren Erfahrungen mit der gleichen visuellen Situation zählen. Weil nun die betreffende Standard-Testsituation für das Phänomen zwei Interpretationen zulässt, kann es eben auch manchmal geschehen, dass zwei Flächen von an sich gleicher Helligkeit dem visuellen System nicht als gleich erscheinen, sondern dass die eine heller und die andere dunkler wirkt, als sie wirklich sind. Auch wenn diese Deutung des Phänomens vielleicht befremdlich sein mag, dürfte sie den von George Berkeley aufgezeigten Widerspruch zwischen dem, was das Auge aufnimmt und dem, was wir sehen, doch besser als andere Ansätze erklären.

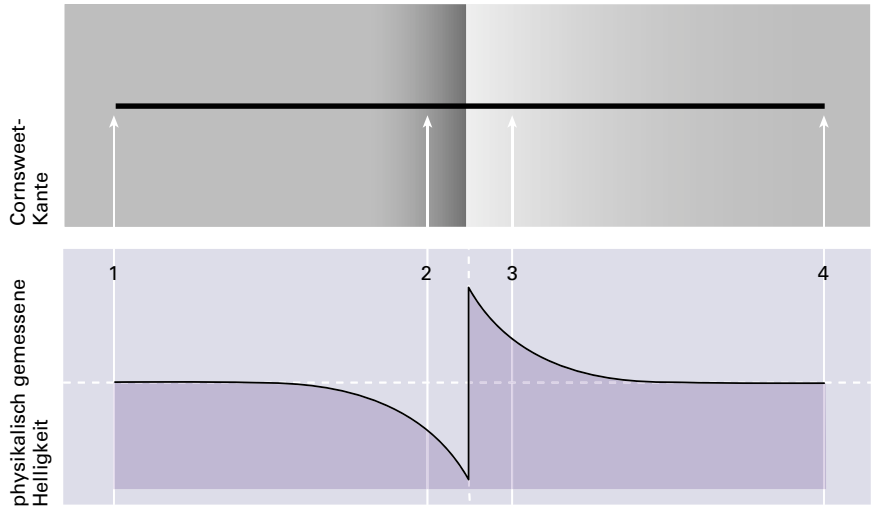
Falls richtig, müsste sich der Effekt auch in komplexeren visuellen Situationen zeigen. Er sollte immer dann auftreten, wenn die Erfahrung sagt, dass zwei gleich erscheinende Felder nur wegen der Beleuchtung gleich aussehen, dass sie aber an sich unterschiedlich viel Licht reflektieren. Ein gutes Beispiel dafür ist der Cornsweet-Effekt, den der amerikanische Psychologe Tom Cornsweet von der Universität von Kalifornien in Irvine Ende der 1960er Jahre beschrieb.



Täuschende Schachtel: Wer würde denken, dass die Flächen von Deckel und Boden den gleichen Grauwert aufweisen?

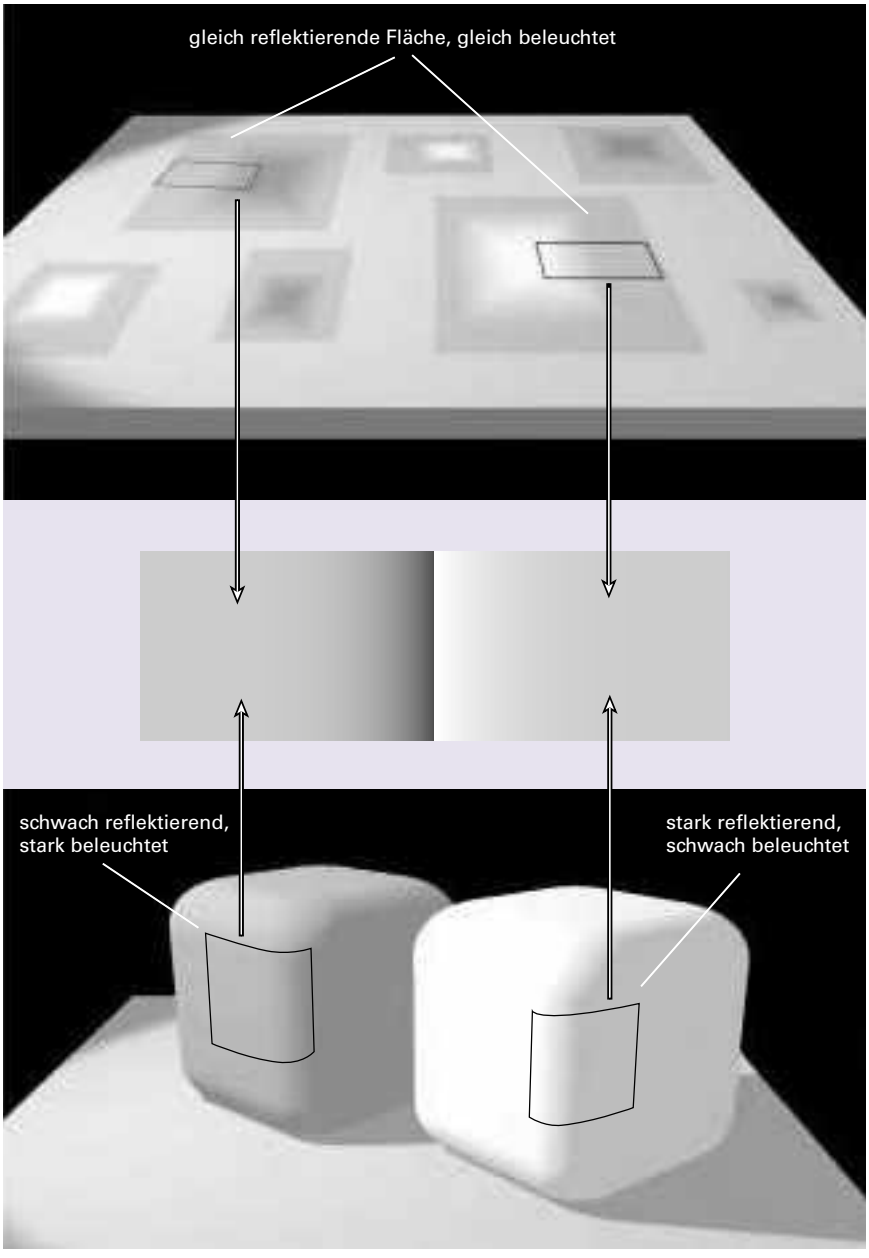
Bei dieser visuellen Täuschung stoßen zwei Flächen zusammen, die an der Anstoßkante unterschiedlich hell sind. Nach außen hin verändert sich ihre Helligkeit: Die innen helle Fläche wird nach außen dunkler, die dunkle heller, sodass beide Flächen im äußeren Bereich den gleichen Grauwert haben. Trotzdem nehmen wir die beiden Außenbereiche keineswegs als gleich hell wahr. Sondern wir meinen fälschlich, die Fläche mit der hellen Kante sei tatsächlich viel heller. Diesen Streich spielt uns vermutlich die frühere Erfahrung mit ähnlichen Sinneseindrücken – ein weiterer Hinweis darauf, dass auch der simultane Helligkeitskontrast sich wohl nicht dadurch erklärt, dass die Netzhaut Konturen herausarbeitet.

Der Cornsweet-Effekt mag zunächst recht vertrackt wirken, doch lässt auch er sich nicht schwer damit begründen, dass visuelle Eindrücke objektiv gesehen meh- ▷



BILDNACHWEIS

Der Cornsweet-Effekt: Diese Illusion entsteht, wenn zwei ansonsten gleich helle Flächen an der Anstoßkante in einen klaren Helligkeitsunterschied auslaufen.



AMERICAN SCIENTIST

▷ reres bedeuten können. Wie beim simultanen Helligkeitskontrast können die objektiv gleich hellen Felder auf zwei Weisen zu Stande kommen: entweder dadurch, dass gleich reflektierende Flächen gleich hell beleuchtet werden, oder dadurch, dass unterschiedlich reflektierende Flächen unterschiedlich stark beleuchtet werden. Im ersten Fall könnte es sich etwa um ein graues Blatt Papier handeln, auf das in der Mitte ein weißes und ein schwarzes Band gemalt wurden, die aneinander stoßen. Im zweiten Fall könnte man vielleicht an eine geöffnete Dose mit weißem Boden und schwarzem Deckel denken, die gerundete Kanten hat, schief steht und von oben angeleuchtet wird (untere Bilder links).

Was unser visuelles System daraus macht, hängt vermutlich davon ab, mit welchen dieser oder noch weiterer Situationen es öfter zu tun hatte und mit welchen eher selten oder noch gar nicht. Wahrscheinlich sind wir mit aneinander grenzenden verschieden reflektierenden, verschieden beleuchteten Flächen recht häufig konfrontiert, sodass die Entscheidung hierfür fällt.

Manipulation der Randbedingungen

Wenn die vorgeschlagene Erklärung zutrifft, müsste sich der Cornsweet-Effekt im Experiment durch Manipulation der Randbedingungen verstärken, abschwächen oder ganz ausschalten lassen – obwohl die grundsätzlichen Helligkeitsverhältnisse immer gleich bleiben. Es käme darauf an, die Randbedingungen so zu wählen, dass sich die relativen Wahrscheinlichkeiten verschieben, mit denen das visuelle System mögliche zu Grunde liegende Reizsituationen erlebt. Das gelang tatsächlich bereits in etlichen Experimenten – mit den erhofften Resultaten.

Auch bei der Farbwahrnehmung lassen wir uns von Randbedingungen heftig

Zweideutige Herkunft: Das Netzhautbild gibt nicht Auskunft, ob zwei Flächen, die an der Anstoßkante kontrastieren, von einem flachen bemalten Objekt stammen oder von räumlichen Körpern.

täuschen. Entstehen solche Illusionen auf vergleichbare Art wie die Helligkeitstäuschungen, auch unter dem Einfluss von Erfahrungen? Das erscheint durchaus möglich, denn wie bei den Helligkeiten können gleiche Farbeindrücke auf der Netzhaut auf unterschiedlichen physikalischen Effekten beruhen. Wieweit das Lichtspektrum, das beim Auge eintrifft, von den Reflexionseigenschaften des Objektes oder von seiner Beleuchtung herrühren, ist für das Auge unbestimmt.

Dass Farben mehrdeutig sein können, zeigt sehr gut das Phänomen, dass man gleiche Farben in bestimmten Situationen als unterschiedlich auffasst. Diese Erscheinung, der simultane Farbkontrast (oder Farbsimultankontrast) – ist eine Parallele zum simultanen Helligkeitskontrast (siehe Kasten unten). Sieht man zwei Flächen von gleicher spektraler Zusammensetzung – also genau gleicher Farbe – vor farblich verschiedenen Hintergründen, wirken sie nicht mehr gleich. Auch hier können die physikalischen Farbwerte der Objekte – Tönung, Leuchtkraft, Sättigung – unterschiedlich zu Stande kommen: durch die Reflexionseigenschaften der beiden Flächen (gewissermaßen ihre Ausgangsfarbe) und durch Spektralzusammensetzung und Intensität der Beleuchtung.

Was Farben über ihre Herkunft erzählen

Bislang postulierten die meisten Erklärungsansätze zum simultanen Farbkontrast-Effekt in der einen oder anderen Weise, das visuelle System würde so etwas wie einen farblichen Mittelwert aus dem erblickten Farbfeld und seinem Umfeld finden. Doch wie schon beim simultanen Helligkeitskontrast können auch diese Ansätze manche Erscheinungen nicht erklären. Man kann nämlich auch Situationen gestalten, in denen der gemittelte Farbwert gleich ist und dennoch ein unterschiedlicher Farbeindruck entsteht.

Unsere Deutung des Phänomens bezieht wiederum die visuelle Erfahrung ein. Im Prinzip handelt es sich um die gleiche Erklärung wie vorher: Ein Farbeindruck eines Objekts und seiner Umgebung auf der Netzhaut kann auf die unterschiedlichste Weise durch vielerlei mögliche Mischungen von Beleuchtung und Reflexionseigenschaften – und noch andere Einflüsse – zu Stande gekommen sein. Die physikalische Herkunft des Abbildes auf der Netzhaut ist somit höchst unsicher. Auch hier wieder bietet sich als Grund für Täuschungen an, dass das visuelle System Rückmeldungen über den früheren Umgang mit solchen Situationen berücksichtigt. Wahrgenommen wird dann letztlich das, was im realen Leben am häufigsten auftritt.

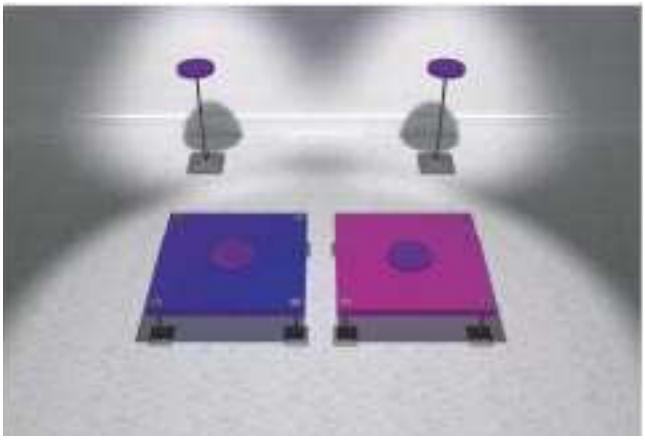
In gleicher Weise könnte die umgekehrte Illusion zu Stande kommen: dass uns ein identisches Objekt unter farblich verschiedener Beleuchtung in seiner Färbung praktisch unverändert erscheint – ▷

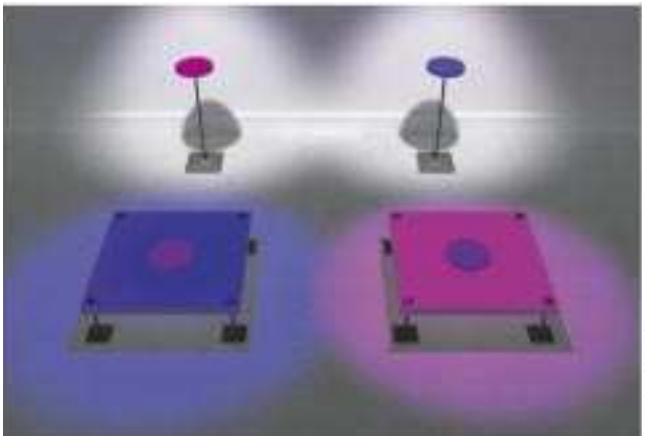
Der simultane Farbkontrast

Mehrdeutige Herkunft zu berücksichtigen

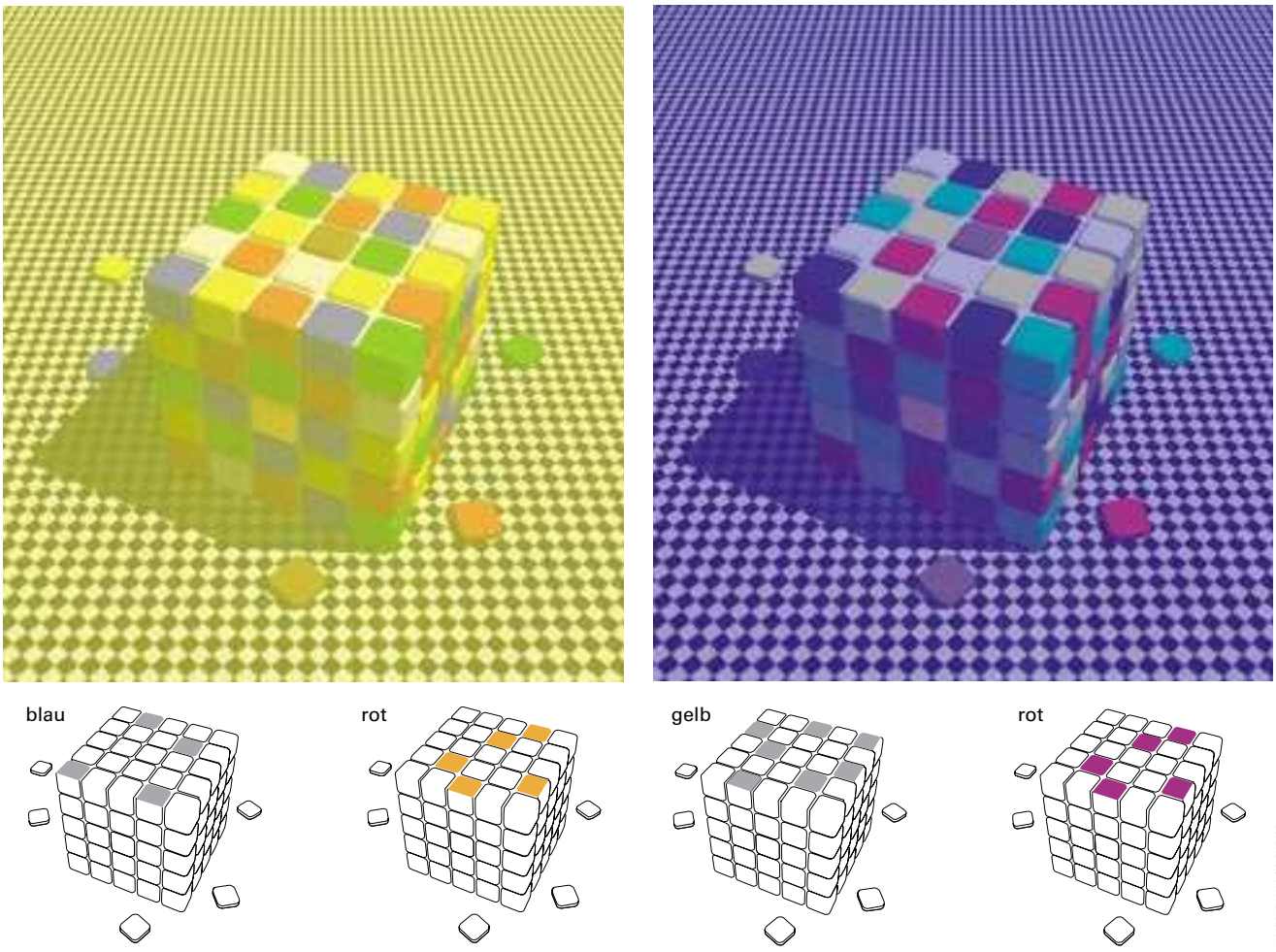
Zwei Farbnuancen meint man zu sehen (Bilder links). Doch es sind drei Lila-Töne! Die Farbe der runden Scheiben in der Mitte ist in beiden Fällen die gleiche!

Nicht allein die Reflexionseigenschaften eines Objekts bestimmen seinen vom Auge registrierten Farbwert (Bilder unten). Im linken Arrangement werden zwei Scheiben des gleichen Ausgangsfarbtons gleich hell mit weißem Licht bestrahlt. Im rechten entsteht die gleiche Farbnuance dadurch, dass die Scheibe rötlicherer Ausgangsfarbe blau bestrahlt wird, die Scheibe des bläulicheren Ausgangstons durch stärker rothaltiges Licht.





AMERICAN SCIENTIST

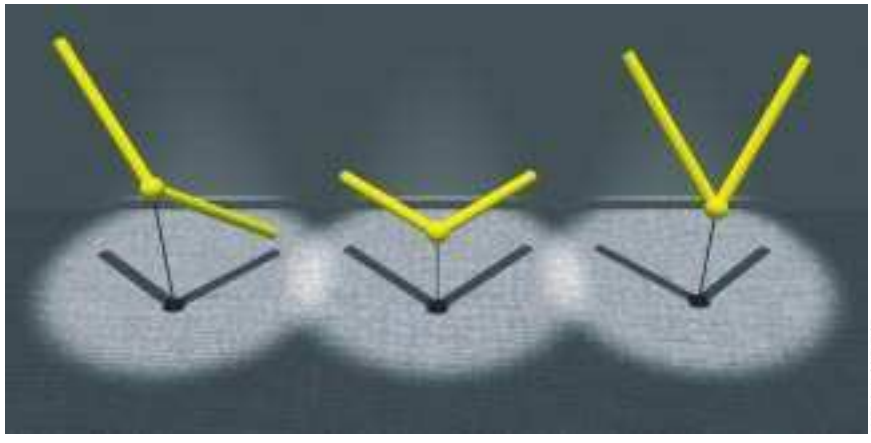


▷ wir es also an seiner Farbe wieder erkennen –, obwohl die vom Auge gesehenen Farben doch in Wirklichkeit vollkommen verschieden sind.

Dies ist eine alltägliche Erfahrung. Manches empfinden wir sogar noch dann als leuchtende Farbe, wenn es eigentlich nur noch ein Grauwert ist. Bei näherem Hinsehen zeigt dieses Beispiel der nur scheinbaren Farbgleichheit frappant, wie stark wir gerade beim Farbensehen Illusionen unterliegen.

Bei einem von uns konstruierten Würfel mit vielen verschiedenfarbigen Flächen ist dies auf die Spitze getrieben (Bild oben). Es fällt uns nicht schwer, beim linken und beim rechten Würfel trotz völlig verschiedener Beleuchtung weitgehend die gleichen Farben zu erkennen – obwohl sie objektiv alles andere als gleich sind. Andererseits erkennen wir die physikalisch gleichen Felder nicht einmal: Die Felder, die beim linken Würfel blau aussehen, haben objek-

Vermeintliche Farbkonstanz: Wir glauben, die Felder des Würfels in ihren richtigen Farben zu sehen, auch wenn alles in gelbes oder blaues Licht getaucht ist. Wie stark wir uns täuschen, zeigen die Skizzen darunter. Was am linken Würfel blau zu leuchten scheint, ist objektiv grau. Beim rechten Würfel halten wir die grauen Flächen für strahlend gelb.



Geometrische Spiele: Bilder auf der Netzhaut mit gleichen Winkeln und Kantenlängen lassen sich durch vielerlei räumliche Anordnungen von Gegenständen hervorrufen. Nicht nur die Winkel dieser Gabeln sind verschieden groß, auch die Arme sind verschieden lang.

tiv das gleiche Grau wie die gelb wirkenden Felder beim rechten Würfel.

Auch der umgekehrte Effekt lässt sich erzwingen. Man kann Farbfelder, die unter neutralen Verhältnissen verschiedenfarbig wirken würden, so darstellen, dass sie nun gleichfarbig erscheinen. Man muss nur dafür sorgen, dass sie in einem Zusammenhang stehen, der den dazu passenden Erfahrungen mehr als andere Situationen entgegenkommt. Beides, der Effekt der simultanen Farbkonstanz und der des simultanen Farbkontrastes, dürfte demzufolge letztlich die gleiche Ursache haben: eine hohe Wahrscheinlichkeit für Erfahrungen mit solchen Situationen im Alltag.

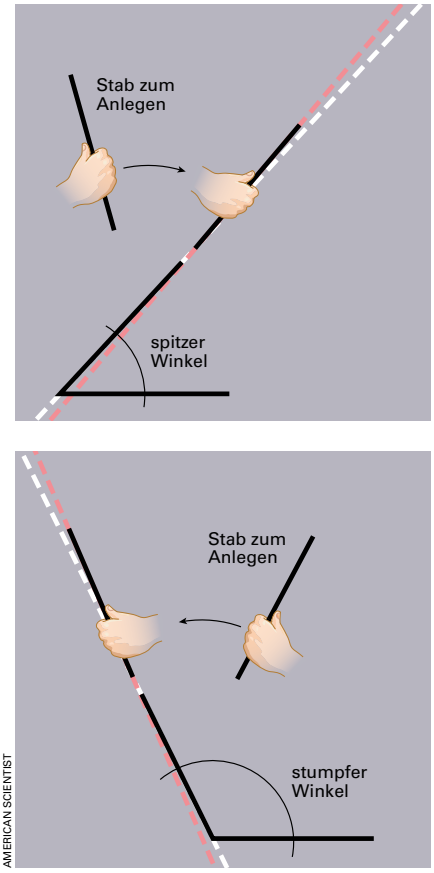
Falsch schätzen, um die Dinge richtig einzuordnen

Vielleicht überrascht es nun nicht mehr, dass sich manche geometrischen Täuschungen ähnlich erklären könnten. Wahrnehmungspsychologen haben schon im 19. Jahrhundert herausgefunden, dass wir die Winkel zwischen zwei aneinander stoßenden Linien mitunter falsch beurteilen. So schätzen wir spitze Winkel leicht um ein paar Grad zu weit ein, stumpfe Winkel um ein paar Grad zu eng. Schon Ende des 19. Jahrhunderts kamen viele Ideen auf, wie diese Täuschung wohl zu verstehen sei. Einig wurden sich die Forscher allerdings nicht.

Die verschiedensten räumlichen Beziehungen zwischen zwei Geraden können auf die Netzhaut ein Bild von immer dem gleichen Winkel werfen. Nicht nur die Position im Raum in allen drei Dimensionen, auch die Längenverhältnisse der beiden Geraden können dabei ganz unterschiedlich sein (Bild oben). Somit ist auch bei geometrischen visuellen Eindrücken eigentlich ganz unbestimmt, was ihnen objektiv zu Grunde liegt.

Natürlich machen Menschen seit jeher tagtäglich mit dem Sehen von Winkeln Erfahrungen. Immerfort sind gesehene Winkel in der Realität ganz anders als auf der Netzhaut. Die Möglichkeiten, wie im Netzhautbild gleiche Winkel zu Stande kommen können, sind zwar immens. Doch bei all dem sollte es durchaus systematische Beziehungen geben. Bestimmte Erfahrungen mit Winkeln in der Umwelt müssten sich häufen. Das aber konnten wir experimentell prüfen.

Zunächst ermittelten wir, welche natürlichen, alltäglichen Quellen ein bestimmter auf die Netzhaut treffender



Winkel haben kann und wie wahrscheinlich diese einzelnen Situationen im normalen Leben vorkommen. Wir erkannten dabei tatsächlich, dass Netzhautbilder mit spitzen Winkeln gewöhnlich von etwas größeren Winkeln in der Realität stammen. Das Umgekehrte ist bei Abbildungen stumpfer Winkel der Fall: Diesmal stammen die Projektionen auf der Netzhaut typischerweise öfter von in der Natur etwas kleineren Winkeln. Was als rechter Winkel auf die Netzhaut fällt, entspricht in der Natur sehr oft rechten Winkeln von Objekten. Würden sich Versuchspersonen, die Winkel einschätzen sollen, entsprechend diesen Erfahrungswahrscheinlichkeiten verhalten?

Wir baten Testpersonen, an den einen Schenkel zweier im Winkel aneinander stoßender gerader Linien oder Balken eine Gerade anzulegen, also die Linie mit einem Strich oder einer Leiste zu verlängern. Dies prüften wir in einer Reihe verschieden gestalteter Versuche. Das Ergebnis passte ausnehmend gut zu unserer Hypothese: Kaum je legten die Teilnehmer den Stock oder Strich exakt parallel in Verlängerung der Linie. Er zeigte vielmehr etwas zu weit nach außen, wenn die Leute einen spitzen Winkel vor sich hatten, und etwas zu weit

Kein korrektes Augenmaß – oder doch?
Gewöhnlich täuschen wir uns: Spitze Winkel schätzen wir etwas zu groß ein, stumpfe Winkel etwas zu klein. Doch die Erfahrung besagt, dass im Alltag spitz erscheinende Winkel in Wahrheit etwas größer sind als auf dem Netzhautbild und stumpfe Winkel etwas kleiner.

nach innen, wenn der vorgesetzte Winkel stumpf war (Bild oben). Dieser Befund spricht dafür, dass wir räumliche Beziehungen nicht so sehen, wie sie sich auf der Netzhaut abbilden – und auch nicht so, wie sie in der Realität arrangiert sind. Vielmehr nehmen wir im Grunde wahr, was sich bei solchen Netzhautbildern in der Vergangenheit bewährt hat.

Offenbar ist das der Ausweg aus dem Dilemma, das George Berkeley vor 200 Jahren aufzeigte. Wenn die Netzhaut mehrdeutige Informationen über Helligkeiten, Farben oder geometrische Verhältnisse empfängt, orientiert sich das visuelle System daran, wie wahrscheinlich die einzelnen möglichen Situationen sind oder genauer gesagt bisher waren. Erst daraus ergibt sich die Wahrnehmung. Genau genommen sehen wir nicht das, was ist, sondern das, was war. Unser visuelles System ist eine hervorragende Statistikerin. ◁

Dale Purves (rechts) hat an der Duke University in Durham (North Carolina) die George-Barth-Geller-Professur für neurobiologische Forschung und eine Professur für Psychologie und Gehirnwissenschaften. **R. Beau Lotto** (links) ist Assistenzprofessor am University College London. **Surajit Nundi** arbeitet an der Duke University in Neurobiologie.

© American Scientist Magazine (siehe www.americanscientist.org)

Die Autoren danken Mark Williams für seine Hilfe bei vielen der Abbildungen und den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) für ihre Unterstützung.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

A Rationale for the Structure of Color Space. Von R. B. Lotto und D. Purves in: Trends in Neuroscience, Heft 25, S. 84 (2002).

Why We See Things the Way We Do: Evidence for a Wholly Empirical Strategy of Vision. Von D. Purves et al. in: Philosophical Transaction of the Royal Society of London B, Nr. 356, S. 285 (2001).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Von der Bohne zum Espresso

Für Kaffee höchster Qualität muss alles stimmen: von den Anbau- und Erntebedingungen über die Röstung und das Aufbrühen bis hin zur Wahl der Tasse. Nur dann entfalten sich die vielen hundert Aromastoffe, die den Geschmack eines Espresso ausmachen.

Von Ernesto Illy

Unter den Genüssen, die der Alltag unseren Sinnen bietet, kommt wenig einer guten Tasse Kaffee gleich. Frisch gebrüht aus frisch gerösteten Bohnen verströmt das dampfende Getränk ein verführerisches Aroma, das Schläfer aus ihren Betten und Passanten in Cafés lockt. Millionen Menschen auf der ganzen Welt kämen nicht durch den Tag ohne das Gefühl geistiger Klarheit, zu dem ein Koffeinstoß verhilft.

Tatsächlich verbirgt sich hinter dem so vertrauten Getränk eine ungeahnte chemische Komplexität. Die Gewinnung und Röstung der Bohnen, ja selbst das Aufbrühen steckt voller Finessen. Alle Verarbeitungsschritte beeinflussen auf subtile Weise die vielen hundert Verbindungen, die Geschmack, Aroma und Körper von Kaffee ausmachen. Hätten Experten in den Röstereien nicht ein tiefes Verständnis dafür entwickelt, wäre eine Tasse guten Kaffees ein seltener Glücksfall.

Kenner sind sich einig, dass die Quintessenz von Kaffeegenuss im Espresso liegt: einem dunklen, undurchsichtigen Gebräu in einer kleinen, dickwandigen Porzellantasse, bedeckt von einer samtartigen rötlich braunen Schicht Schaum. Diese überraschend langlebige Crema hält mit ihren winzigen Gasbläschen, die von einem Flüssigkeitsfilm umgeben sind, Duft und Aroma des Kaffees zurück und lässt ihn nicht so schnell abkühlen.

Das Wort Espresso kommt daher, dass das Getränk auf Bestellung und ausdrücklich (ex-presso) für diese eine Tasse hergestellt wird. Eine spezielle Maschine presst eine kleine Menge erhitzten Wassers mit Hochdruck durch einen komprimierten Kuchen aus fein gemahlenem und gerösteten Kaffeepulver. Heraus kommt eine konzentrierte Flüssigkeit, die nicht nur lösliche Bestandteile, sondern auch fein verteilte, winzige Öltröpfchen mit vielerlei Aromastoffen enthält. Zusammen geben sie dem Espresso seinen einzigartig vollen Geschmack und Geruch. Die spezielle Zubereitung bringt die Inhaltsstoffe der Bohnen konzentriert und optimal zur Geltung.

Für Kaffee höchster Qualität muss von den Anbau- und Erntebedingungen über die Verarbeitung bis zur Wahl der Tasse alles stimmen. Schon auf der Plantage gilt es, eine Unmenge von Variablen zu überwachen und zu steuern. Sobald eine Kaffeekirsche reif am Strauch hängt, kann nichts mehr zugefügt oder weggenommen werden: Das volle Inventar an Geschmacksstoffen und ihren Vorläufern muss bereits vorhanden sein.

Für eine Tasse Espresso benötigt man 50 bis 55 geröstete Bohnen; eine einzige minderwertige verdirbt den Geschmack schon spürbar. Das hängt damit zusammen, dass der Geruchs- und Geschmackssinn bei unseren Vorfahren als Abwehrmechanismus gegen verdorbene – und daher ungesunde – Lebensmittel entstand. Nur mit modernster Technologie gelingt es, mit vertretbarem Aufwand fünfzig fast perfekte Bohnen zuverlässig aufzuspüren.

Rohe Kaffeebohnen sind die Samen von Pflanzen aus der Familie der Rubi-

TINA WEST

Nicht ohne Grund ist der Espresso für viele das Nonplusultra an Kaffeegenuss. Seine besondere Zubereitung bringt die Inhaltsstoffe der Bohnen optimal zur Geltung.

aceae (Rötel- oder Krappgewächse), die mindestens 66 Arten der Gattung *Coffea* umfasst. Kommerziell genutzt werden nur *Coffea arabica*, die etwa zwei Drittel der Weltproduktion ausmacht, und *C. canephora*, die für das restliche Drittel aufkommt und auch *C. robusta* heißt. Deren Pflanzen haben die bei allen wilden *Coffea*-Arten üblichen 22 Chromosomen. *C. arabica* verfügt dagegen über die doppelte Anzahl und lässt sich daher nicht mit anderen Kaffeesorten kreuzen.

Kirschen mit zwei Kernen

Wie der Name schon sagt, ist *C. robusta* ein wenig krankheitsanfälliger, ertragreicher Baum. Er wächst bis zu zwölf Meter hoch und gedeiht am besten in warmem, feuchtem Klima. Der aus seinen Bohnen gebrühte Kaffee verfügt über einen beträchtlichen Körper und ein etwas strenges, erdiges Aroma. Der Koffeingehalt liegt mit 2,4 bis 2,8 Prozent ziemlich hoch. Obwohl Robusta-Bohnen von vielen Händlern verkauft werden, ergeben sie keinen Kaffee höchster Qualität.

Der Arabica-Baum, der aus dem äthiopischen Hochland stammt, liefert nur geringe bis mittlere Erträge, wächst nicht höher als fünf bis sechs Meter und ist recht empfindlich: Er benötigt ein gemäßigtes Klima und viel Pflege beim Anbau. In Plantagen werden die Sträucher auf eine Höhe von 1,5 bis 2 Metern gestutzt. Kaffee aus Arabica-Bohnen hat ein intensives, volles Aroma, das an Blumen, Früchte, Honig, Schokolade, Karamell oder getoastetes Brot erinnern kann. Sein Koffeingehalt geht nie über 1,5 Gewichtsprozent hinaus. Höhere Qualität und besserer Geschmack schlagen sich auch im Preis nieder: Arabica kostet deutlich mehr als sein robuster, etwas grobschlächtigerer Verwandter.

Ergiebiger Regen bringt die Arabica-Pflanzen zum Blühen. Etwa sieben Monate später erscheinen rote oder gelbe Früchte, die man Kirschen nennt. Jede enthält zwei längliche Samen: die Kaffeebohnen. Da ein Ast gleichzeitig Blüten und Früchte tragen kann, sind Zeigefinger und Daumen die besten Werkzeuge, um nur die reifen Kirschen zu pflücken. Beim maschinellen Ernten oder Abstreifen ganzer Zweige mit der Hand werden unweigerlich auch unreife Kirschen gesammelt.

Die Qualität der Bohnen hängt von vielen Faktoren ab. Dazu gehört das genetische Material der Pflanze, aber auch die Beschaffenheit des Bodens, auf dem sie gewachsen ist. Hinzu kommt das Mikroklima, also zum Beispiel die Höhe, die Menge an Regen und Sonnenschein sowie das Ausmaß der täglichen Temperaturschwankungen. Zusammen mit den angewandten Röstverfahren bestimmen diese landwirtschaftlichen und geografischen Bedingungen die Geschmacksvielfalt von Kaffeebohnen, aus denen dann die unterschiedlichen Mischungen für den Einzelhandel hergestellt werden. ▷

TINA WEST

Eine Maschine hilft, die ganz speziellen Extraktionsbedingungen für Espresso einzuhalten.

▷ Die Kaffeekirschen müssen sofort nach der Ernte verarbeitet werden, da sie sonst faulen. Das ältere, traditionelle Verfahren ist, sie zunächst an der Sonne zu trocknen. Dazu werden sie auf einer Terrasse ausgebreitet und immer wieder umgerührt, damit die Früchte gleichmäßig Wärme und Luft bekommen. Nach drei bis fünf Wochen lassen sich die getrockneten Kirschen maschinell schälen, wobei das Fruchtfleisch samt der »Pergamenthaut« um die Bohnen entfernt wird.

Bei dem alternativen nassen Verfahren kommen die Früchte in den »Pulper«. Dieser quetscht das Fruchtfleisch so schonend ab, dass die Bohnen unversehrt in der Pergamenthaut verbleiben. Eine noch anhaftende Schleimschicht muss anschließend durch Fermentation und Waschen entfernt werden. Nach einem Trockenschritt wird schließlich auch die Pergamenthaut abgeschält. Das Ziel ist bei beiden Verfahren dasselbe: Die Kaffeekirschen mit ihrem Wasseranteil von 65 Prozent auf die rohen, grünen Kaffeebohnen zu reduzieren, die nur noch zehn bis zwölf Prozent Wasser enthalten.

Eine der größten Herausforderungen bei der Produktion von Spitzenkaffee besteht darin, ausschließlich erstklassige grüne Bohnen zu verwenden. Qualitätsbewusste Firmen wie Illycaffè in Triest (Italien) nutzen viele raffinierte Kontrolltechniken, um den Anteil an minderwertigem Rohmaterial zu minimieren. Beispielsweise werden angeschimmelte Bohnen durch UV-Fluoreszenzanalyse erfasst. Ein spezielles Abbildungsverfahren erzeugt außerdem von jeder Charge einen »Fingerabdruck« im gelbgrünen, roten und infraroten Spektralbereich.

Schließlich kontrolliert ein dichromatisches Sortiersystem, das Illycaffè zusammen mit der englischen Firma Sortex entwickelt hat, die Bohnen unmittelbar vor der Röstung noch einmal. Während sie in Behälter fallen, entdecken photoelektrische Zellen die letzten »Nieten«, die sofort einzeln mit einem Luftstoß aus einer Düse entfernt werden. Das geschieht mit einer Präzision, derer selbst das geübteste Auge nicht fähig wäre. Auch die Geschwindigkeit von 400 Bohnen pro Sekunde ließe sich beim Sortieren von Hand unmöglich erreichen.

Eine reife grüne Kaffeebohne besteht aus Zellen mit ungewöhnlich kräftigen Wänden. Sie sind fünf bis sieben Mikrometer dick – eine Ausnahme im Pflanzenreich. Die Zellen selbst haben Durchmesser zwischen 30 und 40 Mikrometern. Beim Rösten dienen sie als winzige Reaktoren, in denen unter Wärmezufuhr all die chemischen Reaktionen ablaufen, die den verführerischen Geschmack und Duft von Kaffee erzeugen.

Die Zellen unreifer Bohnen haben dünnere Wände. Außerdem fehlen ihnen wichtige Vorläuferproteine für die späteren Aromastoffe, die sich erst in den letzten Stadien des Reifungsprozesses bilden. Angefaulte Bohnen haben diese entscheidenden Bestandteile dagegen durch die Wirkung von Schimmel oder Bakterien eingebüßt.

Die Röstung ist ein pyrolytischer (hitzegetriebener) Prozess, der die chemische Komplexität der Bohnen enorm steigert. Das Aroma von grünem Kaffee enthält etwa 250 flüchtige Moleküle, bei geröstetem Kaffee sind es mehr als 800.

Die Röstmaschine ist im Grunde nur ein riesiger heißer rotierender Zylinder. Beim Erhitzen der Bohnen verwandelt sich das Restwasser in den Zellen in Dampf, der verschiedene komplizierte chemische Reaktionen zwischen den Zuckern, Proteinen, Lipiden und Mineralstoffen im Zell-Innern auslöst.

Verfeinerung durch Rösten

Bei Temperaturen zwischen 185 und 240 Grad Celsius läuft der wohlbekannte Karamellisierungsprozess ab, auch Maillard-Reaktion genannt. Dabei verbinden sich die Zucker mit Aminosäuren, Peptiden und Proteinen. Die Endprodukte sind Glykosylamin und Melanoidine, beides bräunliche, bitter-süße Substanzen, welche die Hauptgeschmacksnote von Kaffee bilden. Außerdem wird eine Menge Kohlendioxid erzeugt: bis zu zwölf Liter je Kilogramm gerösteten Kaffees.

Daneben entsteht eine breite Palette an kleinen, aromatisch riechenden Molekülen; diese flüchtigen Verbindungen geben dem Kaffee die vertraute Duftnote. Der Dampf und das Kohlendioxid bleiben innerhalb der dicken, wenig porösen Zellwände eingesperrt und treiben so den Druck auf Werte von 20 bis 25 Atmosphären. Einige Zellen platzen schließlich,

Wissenswertes über Kaffee

▶ Mit einem jährlichen Konsum von mehr als 400 Milliarden Tassen ist Kaffee das populärste Getränk der Welt (abgesehen von Wasser natürlich).

▶ Beim Handelsvolumen in Dollar (etwa 20,4 Milliarden im Jahr 2000) steht Kaffee nur hinter Erdöl zurück.

▶ 52 Prozent der erwachsenen US-Amerikaner – das sind 107 Millionen – trinken jeden Tag Kaffee, weitere 28 Prozent oder 57 Millionen gelegentlich.

▶ Amerikanische Kaffeetrinker konsumieren im Durchschnitt 3,3 Tassen oder 350 Milliliter am Tag.

▶ Die Deutschen bestreiten rund 23 Prozent ihres Getränkekonsums mit Kaffee. Der Pro-Kopf-Verbrauch lag im Jahr 2001 bei 159,2 Litern, was knapp 440 Milliliter am Tag entspricht.

▶ Kaffee und Koffein wurden im letzten Vierteljahrhundert eingehend wissenschaftlich untersucht; jedes Jahr erschienen 1500 bis 2000 Arbeiten darüber. Trotzdem ließen sich nur wenige negative Effekte mit einem moderaten Konsum (zwei Tassen am Tag) in Verbindung bringen. Jüngste Untersuchungen legen sogar nahe, dass gerösteter Kaffee eine gute Quelle für Antioxidantien sein könnte.

Zur Geschichte des Kaffees

1000 v. Chr. bis 500 n. Chr.: Der Nomadenstamm der Oramas, der im Königreich von Kefa (dem heutigen Äthiopien) wohnt, isst zerstoßene Kaffeebohnen, mit Fett gemischt und zu Kugeln in Golfballgröße geformt, als Muntermacher.

Um 600: Kaffee gelangt über das Rote Meer nach Arabien (das heutige Jemen).

Ende des 15./Anfang des 16. Jahrhunderts: Moslemische Pilger bringen Kaffeebohnen, bisher ein arabisches Monopol, bei der Rückkehr aus Mekka in die Türkei, nach Ägypten und Syrien. In Konstantinopel, Damaskus und anderen Städten des Nahen Ostens öffnen »arabische« Kaffeehäuser; dort lernen auch europäische Händler, vor allem Venezianer, das Getränk kennen.

Um 1600: Papst Clemens VIII. wird von seinen Beratern gedrängt, das Lieblingsgetränk der ungläubigen osmanischen Türken als »bitter schmeckende Erfindung des Satans« zu verdammen. Stattdessen setzt sich das Kirchenoberhaupt mit seiner ganzen Autorität für den Kaffee ein und macht ihn so zu einem für Katholiken akzeptablen Getränk.

1616: Niederländische Unternehmer beginnen den kommerziellen Kaffeeanbau mit einer aus Jemen stammenden Kaffeepflanze.

1658 (nach anderen Quellen 1690): Die Holländer bauen Kaffee in Ceylon und ihrer ostindischen Kolonie Java an.

1714: Der Bürgermeister von Amsterdam schenkt dem französischen König Ludwig XIV eine Kaffeepflanze aus Java.

1723: Der französische Marineoffizier Gabriel Mathieu de Clieu nimmt drei Kaffee-Setzlinge, die er unter fragwürdigen Umständen aus den Königlichen Botanischen Gärten erhalten hat, mit auf eine gefährliche Reise zur Karibik-Insel Martinique, wo eine der Pflanzen gedeiht.

1727: Eigentlich soll Francisco de Melo Palheta, ein portugiesisch-brasilianischer Beamter, nur einen Grenzstreit zwischen den beiden Kaffee anbauenden Kolonien Niederländisch- und Französisch-Guayana schlichten. Er nimmt jedoch die Gelegenheit wahr und schmuggelt einige Kaffee-Setzlinge auf seine heimatlichen Güter.

1905: Der Bremer Kaffee-Importeur Ludwig Roselius erfindet den koffeinfreien Kaffee.

1933: Francesco Illy patentiert die erste automatische Espressomaschine.

1961: Ernesto Valente aus Foema entwirft den Prototyp der modernen Espressomaschine.

was zu charakteristischen Knallgeräuschen führt.

Je nach Temperatur und Verfahren kann der Röstprozess zwischen 90 Sekunden und 40 Minuten dauern; üblich sind zwölf Minuten. Dabei wächst das Volumen der Kaffeebohnen um gut die Hälfte, während ihre Masse um ein Fünftel abnimmt. Je nach Röstdauer laufen unterschiedliche Reaktionen in der Zelle ab, und folglich ist auch das Resultat verschieden. Kurzes Erhitzen auf sehr hohe Temperaturen minimiert den Gewichtsverlust, verleiht dem Kaffee jedoch einen metallisch bitteren Geschmack. Er rührt von Polyphenolen her, die nicht genug Zeit hatten, vollständig abzureagieren. Langes Rösten ist oft in ärmeren Ländern üblich, wo sich viele Verbraucher nur die billigen Bohnen minderer Qualität leisten können. Es vertreibt alle unerwünschten Geschmacks- und Duftstoffe, aber leider ebenso die erwünschten. Heraus kommt ein ziemlich fades, bitteres Getränk.

Optimal ist eine mittlere Röstdauer bei mäßigen Temperaturen. Je höher und länger man die Bohnen erhitzt, desto ärmer wird ihr Aroma, und die Bitterstoffe überwiegen. Umgekehrt kann sich bei zu niedrigen Rösttemperaturen der Geschmack gar nicht erst richtig entwickeln, und die ursprünglich vorhandene Säure drängt sich in den Vordergrund.

Nase und Analysegerät sind ebenbürtige Instrumente, wenn es darum geht, die beim Kaffeerösten entstandenen Düfte zu identifizieren. Ein Gaschromatograf trennt zunächst die Geruchskomponenten. Dann »erschnuppern« ausgebildete Prüfer die einzelnen Aromen und versuchen sie so weit wie möglich zu definieren. Oft wird schließlich auch noch die genaue chemische Zusammensetzung per Massenspektrometrie bestimmt.

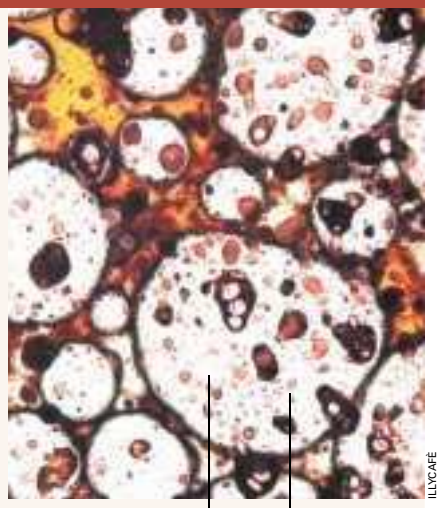
Vielfalt von Duftnoten

Das Riechen der Aromen von geröstetem Kaffee nach ihrer gaschromatografischen Trennung ist eine aufschlussreiche Erfahrung: man kann den Duft von Rosen, Darjeeling-Tee, Schokolade, Vanille und Veilchen wahrnehmen; die geübte Nase entdeckt zudem den Geruch von Trüffeln, Suppe, Käse und Schweiß sowie ein Aroma, das Katzengeruch genannt wird. Verdünnt erinnert es an die Blume von Weißwein der Rebsorte Sauvignon, konzentriert stinkt es jedoch widerlich.

In den Laboratorien von Illycaffè konzentrieren wir uns auf die stärksten Duft- ▷

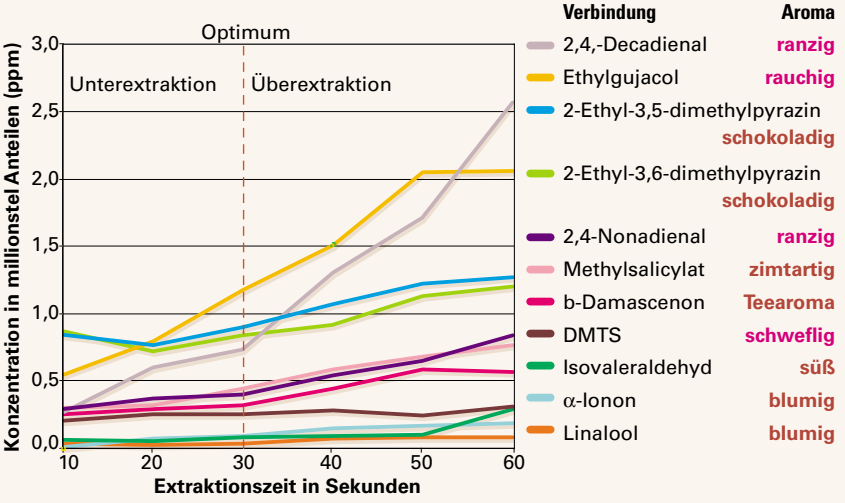
Zur Chemie des Espresso

Die Crema, der rötlich braune Schaum auf dem Espresso, besteht hauptsächlich aus winzigen Kohlendioxid- und Wasserdampfblasen, die von oberflächenaktiven Filmen umgeben sind. Sie erscheinen in dem vergrößerten Querschnittbild als weiße Kreise. Außerdem enthält die Crema aber auch emulgierte Öle (rot geränderte Flecken) mit den wichtigsten Aromastoffen sowie dunkle Bruchstücke der Zellstruktur von Kaffeebohnen.

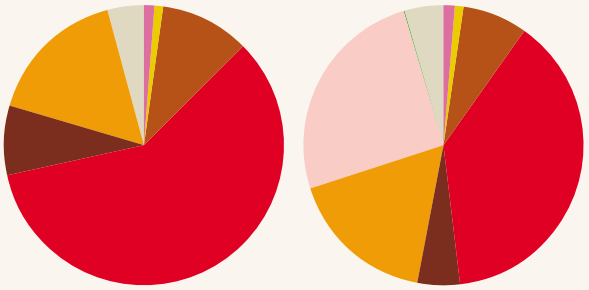


ILLYCAFÉ

Die chemische Zusammensetzung von Espresso ändert sich mit der Extraktionszeit. Wird das Kaffeepulver zu lange (das heißt über die empfohlenen 30 Sekunden hinaus) extrahiert, gelangen auch unerwünschte und weniger gut lösliche aromatische Verbindungen in das Getränk.



Chemische Zusammensetzung von rohem und geröstetem Arabica-Kaffee in Prozent Trockenmasse



grüne Bohnen
(durchschnittlicher Wassergehalt 8 bis 12 Prozent)

geröstete Bohnen
(durchschnittlicher Wassergehalt 0 bis 5 Prozent)

BEIDE GRAFIKEN: NINA FINKEL

▷ stoffe. Stellen Sie sich vor, Sie hören die Aufnahme eines Chors mit 800 Sängern, darunter die kräftigen Solostimmen von Jessye Norman und Luciano Pavarotti. Reduziert man die Lautstärke fast auf null, bleiben die dominierenden Stimmen noch schwach hörbar, während vom Rest des Chores nichts mehr zu vernehmen ist. Analoges gilt für das Verdünnen des Kaffeearomas; ab einem bestimmten Punkt nimmt man nur mehr die stärksten Komponenten wahr. Leider stammen genau diese hervorstechenden Geruchsstoffe von qualitativ minderwertigen, unreifen Bohnen.

Dazu gehören Moleküle wie Ethylbutanoat und Ethylglykolat. Schon Spuren davon können den Geschmack einer Tasse Kaffee ruinieren. Methylisoborneol und Trichloranisol (TCA) erzeugen das erdige, etwas chemisch wirkende Aroma von Robusta-Kaffee. TCA findet sich auch in korkigen Weinen. Die menschliche Nase ist dafür extrem empfindlich: Die Wahrnehmungsschwelle liegt bei sechs Millionsteln eines milliardstel Gramms pro Milliliter (6×10^{-15} g/ml).

Geheimnisse der Zubereitung

Der letzte Schritt ist dann die Transformation der gerösteten Bohnen in eine Tasse Espresso. Das geschieht durch Extraktion der aktiven Komponenten im gemahlenen Kaffee mit Hilfe von heißem Wasser. Dieser Vorgang zeichnet sich beim Espresso durch einige Besonderheiten aus.

Bei der üblichen Filtermethode läuft das Wasser durch eine lose Anhäufung von mittelfein gemahlenem Kaffeepulver. Während des vier- bis sechsminütigen Kontakts nimmt es die meisten löslichen Stoffe auf. So gelangen große Mengen an sehr gut löslichen Säuren und Koffein in die Tasse. Nicht so beim Espresso.

Seine Zubereitung erfordert eine spezielle Apparatur, mit der man Wasser auf eine Temperatur zwischen 92 und 94 Grad Celsius erhitzen und auf einen Druck von neun Atmosphären bringen kann. Der fein bis mittel gemahlene Kaffee wird in einen perforierten Behälter gefüllt und mit einem Stempel fest zusammengedrückt, damit eine kompakte Masse entsteht. Die komprimierten Pulverteilchen haften aneinander, da sie mit einem dünnen Ölfilm bedeckt sind, der so zäh wie Honig ist. Dadurch bilden sie ein dreidimensionales Labyrinth von winzigen Luftkanälen. Der hydraulische Widerstand dieser Masse aus Kaffeepulver

Andere Methoden der Kaffeezubereitung

Filtermethoden
Bei diesen populären Verfahren gibt man fein gemahlenen Kaffee in einen mit Filterpapier ausgelegten Behälter und gießt heißes Wasser darüber. Um auf diese Weise Spitzenkaffee zu erhalten, sollte man das Filter vorab mit heißem Wasser spülen, um den Papiergeruch zu entfernen. Außerdem ist sicherzustellen, dass das fast kochende Wasser nicht länger als vier bis sechs Minuten braucht, um durch das Kaffeepulver zu laufen; denn nur dann werden die erwünschten Geschmacksstoffe optimal extrahiert. Die Aufgusszeit einer automatischen Kaffeemaschine lässt sich über die Wassermenge regulieren.

Die türkische Methode
Man gibt gleiche Teile von gemahlenem Kaffee, Zucker und Wasser in eine langstielige, Ibrik genannte Messing- oder Kupferkanne, die direkt auf dem Feuer sitzt. Fängt die Mischung an zu sieden, wird sie so lange gerührt, bis das Kaffeepulver nicht mehr am Löffel kleben bleibt. Sobald der Aufguss zu kochen und aufzuschäumen beginnt, nimmt man den Ibrik vom Feuer und klopft leicht dagegen, damit der Schaum zusammensinkt. Das Aufkochen wird noch zweimal wiederholt. Heraus kommt ein einzigartig dicker, süßer Sud mit Resten von Kaffeesatz.

Mit der Cafetière nach dem Presso-System
Man übergießt grob gemahlenen Kaffee in einem zylindrischen Glasbehälter mit heißem Wasser und lässt je nach gewünschter Stärke zwei bis fünf Minuten ziehen. Dann presst man das Siebfilter von oben durch den Aufguss und trennt so das Pulver am Boden des Topfes von der Flüssigkeit darüber.

TINA WEST

ist gerade ein wenig kleiner als der Druck des dampfend heißen Extraktionswassers, sodass es mit einer Geschwindigkeit von etwa einem Milliliter pro Sekunde hindurchfließen kann.

Bei einer empfohlenen Durchlaufzeit von 30 Sekunden erzeugt ein geschickter Barista – wie in Italien die Person heißt, welche die Espressomaschine bedient – also etwa 30 Milliliter einer konzentrierten Kaffeelösung. Wegen des kurzen Kontakts enthält sie weniger Säure als Filterkaffee und nur 60 bis 70 Prozent des Koffeins. Gekrönt wird sie von der Crema, an deren Beschaffenheit sich ablesen lässt, ob der Kaffee richtig zubereitet wurde. Hat sie eine helle Farbe, ist der Espresso zu dünn, weil das Pulver zu grob, die Wassertemperatur zu niedrig oder die Durchlaufzeit zu kurz war. Erscheint die Crema sehr dunkel mit einem Loch in der Mitte, war der Kaffee wahrscheinlich zu fein gemahlen oder die Menge zu groß. Weißer Schaum mit großen Blasen weist darauf hin, dass das Wasser zu heiß war, während ein bloßer weißer Fleck in der Mitte der Tasse eine zu lange Durchlaufzeit anzeigt. In beiden Fällen wurde der Pulverkuchen zu stark extrahiert.

Das hindurchgepresste Wasser spült auch unlösliche Stoffe von der Oberfläche der Kaffeeteilchen ab, darunter aromareiche Öle und Stückchen aus der Zellstruktur. Unter dem hohen Druck, den die Espressomaschine erzeugt, wird ein kleiner Teil des Öls emulgiert; pro Tasse sind das etwa 0,1 Gramm. Intakte Zellen im Pulver verursachen ein leichtes Moussieren; denn Gase – insbesondere Kohlendioxid – dringen durch winzige Poren in den Zellwänden ins Freie. Manchmal gelangen auch sehr feine Pulverteilchen zusammen mit Bruchstücken der Zellwand ins Getränk. Sie geben der Crema ein Aussehen, das man als Tigerfell-Look bezeichnet.

Somit umschließt die wässrige Kaffeelösung im Espresso eine Vielzahl fein verteilter Gasblasen, Öltröpfchen und fester Teilchen, die alle kleiner als fünf Mikrometer sind. Chemiker sprechen von einem mehrphasigen Kolloidsystem. Diese Beschaffenheit verleiht dem Espresso viel Körper sowie eine hohe Viskosität und eine geringe Oberflächenspannung. Er bedeckt daher sichtbar die Zunge und setzt, solange er dort bleibt, die flüchtigen Duftstoffe aus den emulgierten Ölen frei. So kommt es, dass sein köstliches Aroma noch bis zu zwanzig Minuten lang nach dem Trinken zu schmecken ist.

Vielleicht wissen Sie den Espresso nach dieser kurzen Einführung in seine komplexe Chemie noch mehr zu schätzen. Zum Glück aber kann man ihn auch ohne solche Kenntnisse genießen. ◁

Ernesto Illy leitet Illycaffè, ein Familienunternehmen in Triest (Italien), das sein Vater 1933 gegründet hat. Als promovierter Chemiker mit einem Aufbaustudium in Molekularbiologie verfolgt er das Ziel, mit Hilfe der Wissenschaft die wahrhaft perfekte Tasse Espresso zu kreieren.

Coffee: Recent Developments. Von R. J. Clarke und O. Vitzthum. Blackwell Science, 2001.

Espresso Coffee: The Chemistry of Quality. Von A. Illy und R. Viani. Academic Press, 1995.

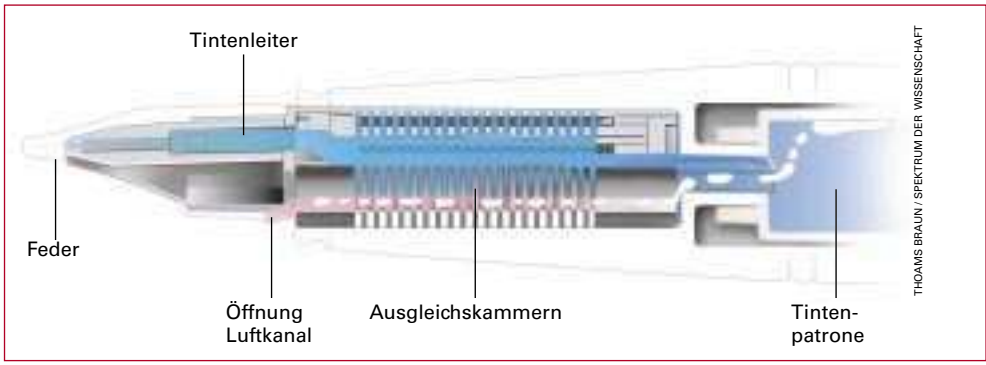
Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Füller & Co.

Vom Federkiel zum elektronischen Stift

Von Klaus-Dieter Linsmeier



Kapillarkräfte ziehen die Tinte aus dem Behälter – hier eine Patrone – durch Tintenleiter, Ausgleichskammern und schließlich Federschlitz zum Papier. Ohne Druckausgleich über einen Luftkanal würde dieser Fluss allerdings abreißen.

Moderne Schreibgeräte haben scheinbar wenig mit den geschlitzten Bambusrohren der Ägypter oder den Federkielen mittelalterlicher Mönche gemein. Und doch arbeiten sie nach dem gleichen Grundprinzip: Kapillarkräfte befördern Tinte oder Paste auf das Papier (siehe Stichwort). Freilich: Füller, Kugelschreiber und Tintenroller sind ungleich einfacher zu handhaben als der Gänsekiel, erspart doch ein Tintenvorrat das Eintunken ins Fass und sorgen präzise mechanische Regelsysteme für einen klecksfreien Tintenfluss. Eine geschlitzte Metallfeder verschließt beim Füller den Tintenkanal, bis sie durch den Schreibdruck leicht aufwärts gebogen wird. Im Spalt zwischen Feder und Kanal sowie im nun leicht geöffneten Schlitz ziehen Kapillarkräfte die Flüssigkeit zum Papier. Ohne weitere Maßnahmen würde sich aber ein Unterdruck im Behälter aufbauen und den gleichmäßigen Fluss stören. Kleckse, Auslaufen oder Tintenmangel waren die Regel, bis der amerikanische Versicherungsvertreter Lewis E. Waterman 1884 eine Belüftung des Tanks entwickelte: Verbrauchte Tinte wird kontrolliert durch Luft ersetzt.

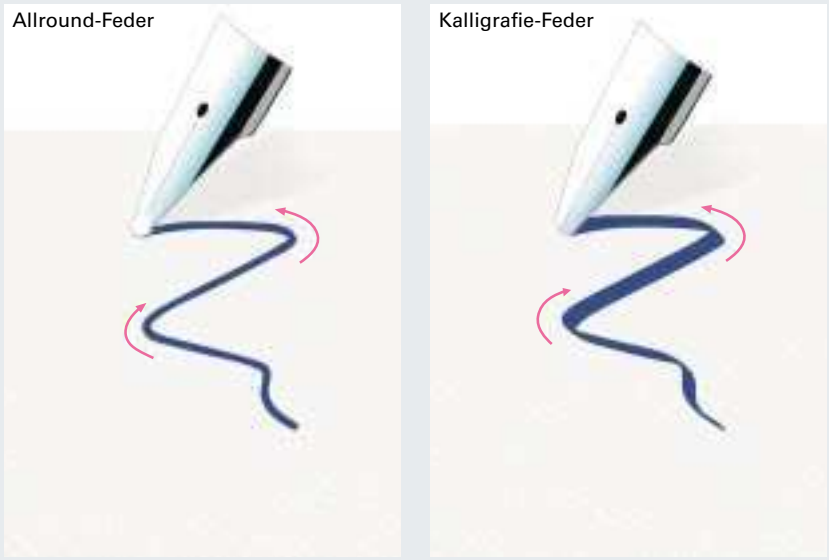
Mit dem Druckausgleich war die Entwicklung des Füllers nicht abgeschlossen. Feine Lamellenstrukturen, die so genannten Ausgleichskammern, speichern vorübergehend Tinte, wenn Temperatur- und Luftdruckschwankungen Flüssigkeit aus dem Vorratsbehälter drücken. Dieses Puffern unterstützt ebenfalls den gleichmäßigen Tintenfluss. Kugelschreiber und Tintenroller ersetzen die Feder des Füllers durch eine Metallkugel, meist aus verschleißfestem Wolframkarbid, die sich in einer Fassung frei drehen kann. Der feine Spalt zwischen beiden liefert die zum Schreiben notwendigen Kapillarkräfte. Während die Mine eines Kugelschreibers farbstoffhaltige Paste enthält (und bei Großraumminen eine Fettabdichtung am hinteren Ende), ist es beim Kugelroller Tinte.

Neuentwicklungen beruhen meist auf einem dieser Prinzipien, versuchen mit modernen Verfahren die Mechaniken oder die ergonomische Handhabung zu optimieren. Auch Werkstoffe und Design spielen eine große Rolle. Während ein Kunststoff-Kugelschreiber im Supermarkt für wenige Euro zu haben ist, kann ein Renommierstück leicht einige hundert kosten. Noch teurer käme derzeit wohl eine Innovation des deutschen Unternehmens Lamy: der Prototyp eines elektronischen Füllers, dessen Tintenfluss durch Piezoventile, Sensoren und Prozessorchips gesteuert wird. Die Vorteile: sofortiges Anschreiben, Auslaufsicherheit und noch gleichmäßigerer Tintenfluss. Eine Option für die Zukunft.

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft. Er dankt Laborleiter **Reinhard Probol** von der Firma Lamy für Sachinformationen.

Die Macht der Feder

Vom Abc-Schüler bis zum Kalligrafie-Künstler reicht das Anwenderspektrum beim Füllhalter. Dem entspricht eine Palette an Federn. Sie bestehen meist aus Edelstahl (eine Vergoldung hat nur optische Vorzüge). Reine Goldfedern sind weicher, allerdings ungleich teurer. Um rascher Abnutzung zu begegnen, enden Schreibfedern in einem Hartmetallkorn (Iridium), das auch die Strichstärke bestimmt. Je nach der individuellen Handhaltung empfiehlt sich ein gerades oder abgeschrägtes Korn, ein gerundetes verzeiht auch wechselnde Handstellungen ohne Kratzen. Ein flaches Korn lässt den Füllhalter dafür sanfter über das Papier gleiten. Für Schönschreiben und Kalligrafie eignen sich kornlose Bandzugfedern.



WUSSTEN SIE SCHON?

Das Patent für das Kugelschreiber-Konzept erhielt 1938 der Ungar László Biró. 1944 lieferte er 30 000 Stück an die britische Luftwaffe, da seine Erfindung unempfindlicher gegen Luftdruckschwankungen als Füllhalter sein sollte. Ab 1945 stiegen auch andere amerikanische Firmen in den Markt ein, doch die Produkte waren anfangs wenig verlässlich. Feinmechanikern und Uhrmachern im Schwarzwald gelang es, mit der notwendigen Präzision Tintenkanäle und Kugelfassungen zu liefern und deutsche Kugelschreiber zu etablieren.

Besondere Probleme bereitet dabei der Flugverkehr: Im **Tintenbehälter** steht die Luft beim Einsteigen unter Atmosphärendruck, in großer Höhe wird aber der Kabinendruck abgesenkt – ohne spezielle Vorrichtungen wären Flecken die Folge. Allerdings wird immer noch empfohlen, einen Füllhalter vor dem Abflug möglichst voll zu tanken.

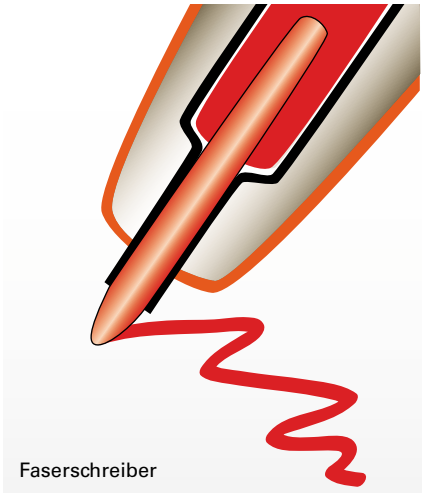
Tintenschreiber haben einen zehnfach stärkeren Fluss an Schreibmittel als Kugelschreiber. Ihr Schriftbild ist somit attraktiver, doch reicht die Mine nur etwa 1000 bis 1500 Meter weit, beim Kugelschreiber sind es je nach Spitze 5000 bis 10 000 Meter.

Schon in der Antike wurden **Mischungen aus Eisensalzen und Gerbsäure** zum Schreiben verwendet, da sie tiefschwarze Spuren hinterlassen. Den Rohstoff für die Gerbsäure gewann man aus Galläpfeln, Wucherungen an Blättern und Zweigen von Eichen. Im Mittelalter setzte sich diese Eisengallustinte mehr und mehr durch und wurde von dem Dresdner Parfümeriefabrikanten August Leonardie zur **Fertigtinte** weiterentwickelt. Die Alternativen sind heute wässrige Lösungen von Anilinfarbstoffen, Konservierungsmitteln und anderen Zusätzen.

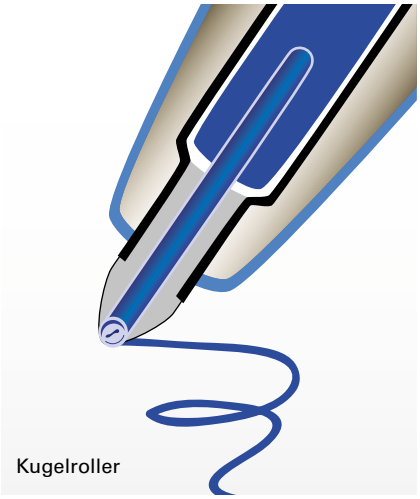
THOAMS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH »FÜLLHALTER FÜR KENNER«, S. 42

Füllhalter mit Tintenbehälter kamen nach 1850 auf den Markt. Erste Systeme waren über einen Gummischlauch mit einem separaten Behälter verbunden. Heute wird Tinte über einen Drehkolben in einen Tank hochgezogen, eine Patrone eingesetzt oder mit einem so genannten Konverter aus einem Tintenglas befüllt.

Faserstifte und Kugelroller verwenden ebenfalls Tinte. Sie wird über einen Docht aus dem Behälter der Mine gezogen und beim Faserstift auch über einen Docht an das Papier abgegeben. Die Tinte kann »frei« gespeichert oder in einem Tampon gebunden sein. Letzteres verhindert zwar eventuelles Auslaufen, doch der Tintenfluss dieser Minen wird mit der Zeit immer schwächer.



Faserschreiber



Kugelroller

THOAMS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

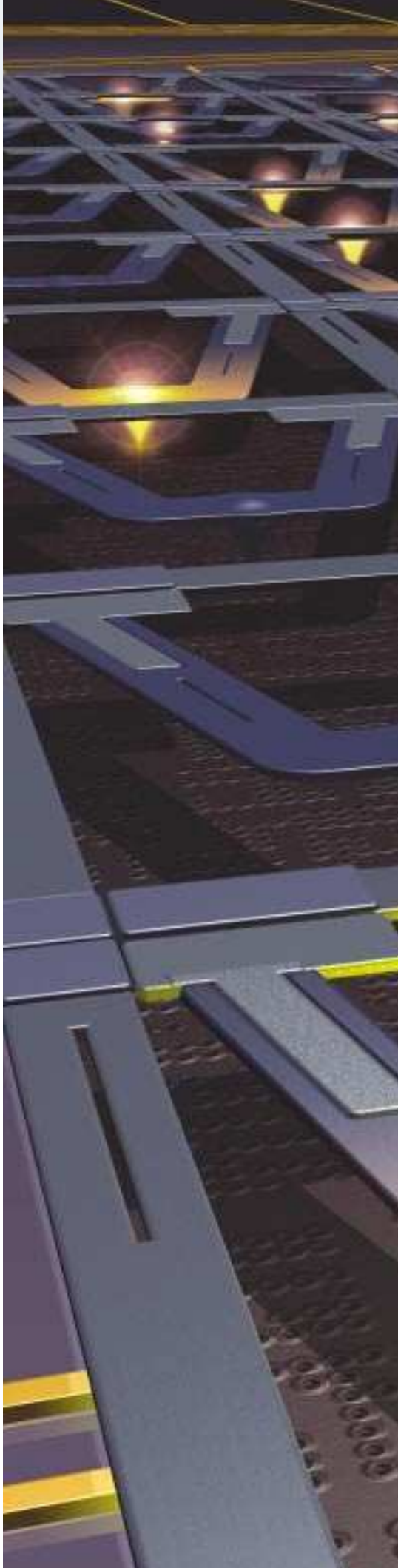
STICHWORT

Kapillarkraft

Kohäsion bezeichnet die gegenseitige Anziehung der Moleküle einer Flüssigkeit, **Adhäsion** (Grenzflächenkräfte) die zwischen ihnen und einem Gefäß, etwa einem Steigrohr. Überwiegt Letztere, wölbt sich der Spiegel der Flüssigkeitssäule konkav nach oben. Die Oberflächenspannung hat dann eine Komponente in diese Richtung, und die Flüssigkeit steigt solange, bis die Gewichtskraft diesen »Kapillareffekt« ausgleicht. Die Steighöhe ist umso größer, je dünner das Röhrchen, je geringer die Dichte des Mediums und je größer seine Oberflächenspannung ist.

Unterwegs zum Nanolaufwerk

Ein nanotechnisch fabrizierter »Tausendfüßler« soll auf einer briefmarkengroßen Chipkarte mehrere Gigabytes Daten schreiben – genügend Speicherplatz für einige Spielfilme oder ganze Bibliotheken. Doch bis zur Marktreife des Produkts sind noch knifflige Probleme zu lösen.

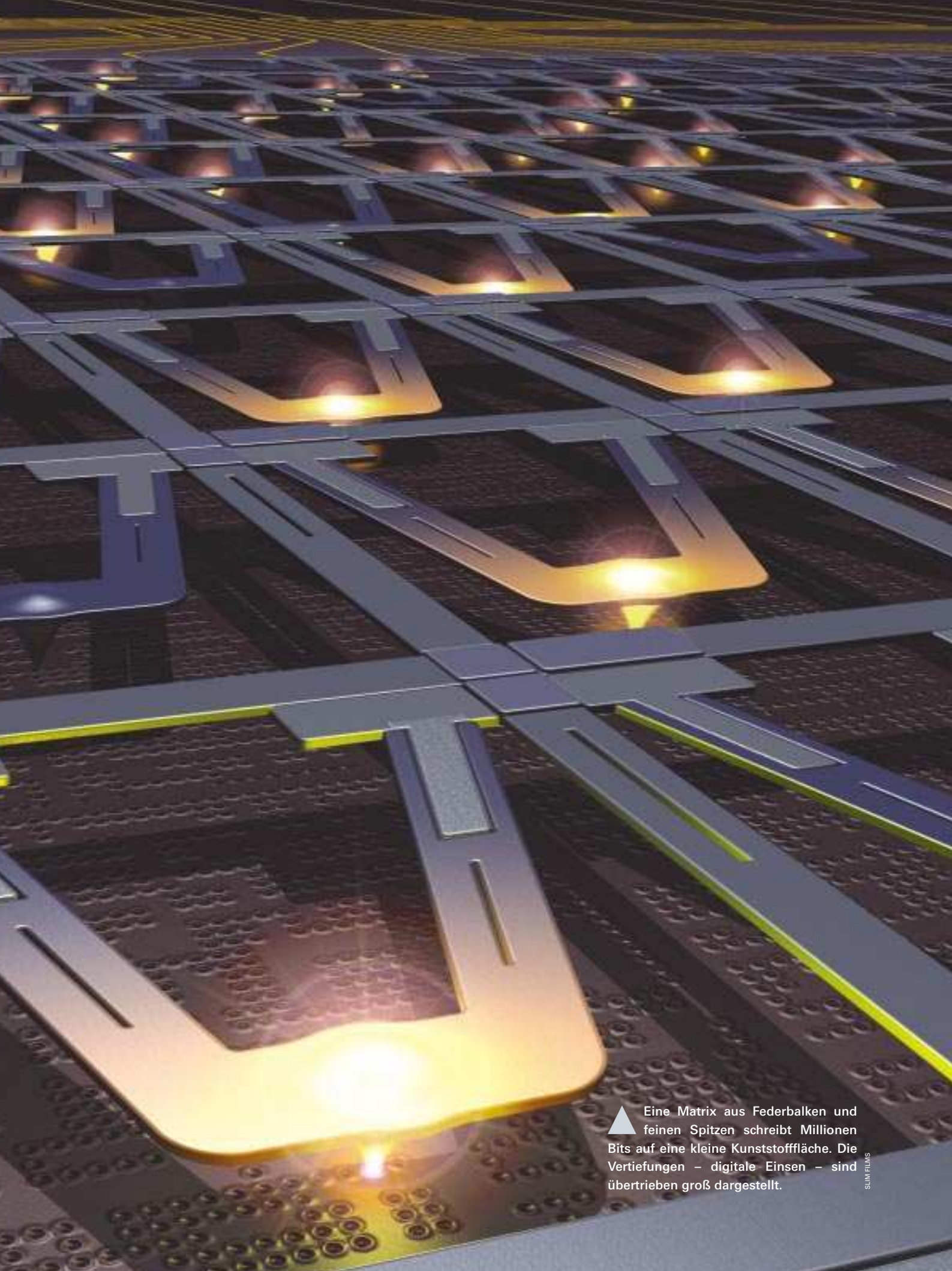


Von Peter Vettiger und Gerd Binnig

Es erfüllt Ingenieure mit Stolz, wenn ein von ihnen entwickeltes Gerät in die Massenfertigung gelangt und bald überall auf der Welt genutzt wird. Wir hegen die begründete Hoffnung, dass wir in den nächsten drei Jahren sogar eine völlig neue Art von Maschine auf den Weg zur Marktreife bringen werden.

Heutzutage wird lebhaft über die Chancen der Nanotechnik diskutiert – den Bau winziger Apparate, die im Bereich von Nanometern (millionstel Millimetern) funktionieren sollen. Insbesondere geht es um mikroelektromechanische Systeme – kurz Mems –, deren mikroskopisch kleine bewegliche Teile mit Verfahren der Computerchip-Produktion hergestellt werden. Solche Geräte weckten zunächst große Erwartungen, sind aber bisher nur selten bis zur kommerziellen Nutzung gediehen. Wir arbeiten nun seit sechs Jahren konzentriert an einem der ersten Projekte für ein nanomechanisches System, das sich für die Massenproduktion eignet, und machen die Erfahrung, dass die Ingenieurtechnik bei so winzigen Größenordnungen untrennbar mit wissenschaftlicher Grundlagenforschung verwoben ist. Auf dem Weg vom ersten Experiment über einen funktionierenden Prototyp bis zum marktgängigen Produkt tauchen immer wieder unerwartete Hindernisse auf.

Unser Projekt bei IBM heißt Millipede (englisch für Tausendfüßler). Bleiben wir im Plan, so wird um das Jahr 2005 eine briefmarkengroße Speicherkarte für Digitalkameras oder tragbare MP3-Player erhältlich sein. Sie wird nicht bloß einige Dutzend Megabytes fassen können wie heutige Flash-Speicherkarten, die für ein paar Video- oder Musiksequenzen reichen, sondern mehrere Gigabytes – genug, um die Musik zahlreicher Compact Discs (CDs) oder mehrere Spielfilme ▷



Eine Matrix aus Federbalken und feinen Spitzen schreibt Millionen Bits auf eine kleine Kunststofffläche. Die Vertiefungen – digitale Einsen – sind übertrieben groß dargestellt.

SLIM FILMS

zu speichern. Es wird möglich sein, Daten von der Karte zu löschen und neue darauf zu schreiben. Ein solches Nanolaufwerk (englisch *nanodrive*) wird sehr schnell arbeiten und nur wenig Energie verbrauchen.

Diese erste Anwendung mag interessant sein, aber so weltbewegend ist sie auch wieder nicht. Immerhin erreichen auch Flash-Speicherkarten allmählich die Kapazität von einem Gigabyte. Doch Millipede speichert digitale Daten völlig anders als magnetische Festplatten, optische Compact Discs oder Speicherchips auf Transistorbasis. Die herkömmlichen Speichertechnologien erreichen nach Jahrzehnten spektakulärer Erfolge die Zielgerade, wo sie in absehbarer Zeit an ihre physikalischen Grenzen stoßen dürften. Hingegen werden die ersten nanomechanischen Laufwerke ihre Möglichkeiten bei weitem nicht ausschöpfen. Jahrzehnte der Weiterentwicklung liegen vor ihnen.

Die Nanodrive-Speicherkarte als erster Schritt von Millipede

Im Prinzip können die digitalen Bits, die von künftigen Millipede-Generationen geschrieben, gelesen und gelöscht werden, immer weiter schrumpfen – bis auf die Größe einzelner Moleküle oder gar Atome. Je kleiner die beweglichen Teile der Nanolaufwerke werden, desto schneller und energiesparender arbeiten sie. Die ersten Produkte mit Millipede-Technik werden höchstwahrscheinlich Speicherkarten für Kameras, Mobiltelefone und andere tragbare Geräte sein. Diese Nanodrive-Karten können die Aufgabe heutiger Flash-Karten übernehmen, bieten aber mehrere Gigabyte Speicherplatz, und das zu geringeren Kosten. Die Technologie könnte sich zudem als großer Vorteil für die Erforschung neuer Werkstoffe erweisen, für die Biowissenschaften – oder für Anwendungen, die heute noch gar nicht absehbar sind.

Gerade diese langfristigen Zukunftsaussichten faszinierten uns, als wir vor sechs Jahren das Projekt begannen. Seither haben wir erlebt, dass manchmal nur eine zufällige Entdeckung über den toten Punkt hinweghilft. Denn zum Glück gibt es nicht nur unerwartete Hindernisse, sondern auch unerwartete Geschenke – als wollte die Natur den Vorstoß in Neuland belohnen. Doch manchmal ist sie nicht so entgegenkommend, und man muss sein Problem selbst lösen. Wir haben dann hart daran gearbeitet, aber auch nicht zu hart. Wenn wir zunächst keine Ahnung hatten, wie wir ein Problem angehen sollten, fanden wir die Lösung vielleicht ein Jahr später. Man muss auf Intuition vertrauen, wenn man zwar annimmt, das Problem sei lösbar, aber noch nicht weiß, wie.

Eigentlich begann das Millipede-Projekt auf einem Fußballplatz. Wir kickten in der Mannschaft des IBM-Forschungslabors in Zürich, wo wir beide arbeiten. Ein weiterer Mitspieler, Heinrich Rohrer, machte uns miteinander bekannt. Rohrer hatte 1963 beim Züricher Labor gleichzeitig mit einem von uns (Vettiger) angefangen und 1981 mit dem anderen (Binnig) bei der Erfindung des Rastertunnelmikroskops (*scanning tunneling microscope*) zusammengearbeitet. Diese Technik ermöglichte es zum ersten Mal, einzelne Atome darzustellen und zu manipulieren.

Im Jahr 1996 hielten wir gemeinsam Ausschau nach einem neuen Projekt in einem beträchtlich veränderten Umfeld. Die frühen 1990er Jahre waren für den IBM-Konzern eine schwierige Zeit gewesen, und das Unternehmen hatte die Abteilung für Laserforschung verkauft, deren Technikbereich Vettiger geleitet hatte. Binnig hatte sein Nebenlabor in München geschlossen und war nach Zürich zurückgekehrt. Zusammen mit Rohrer begannen wir nun zu überlegen, wie wir die Rastersondentechnik – insbesondere das Rasterkraftmikroskop (*atomic force microscope*) – praktisch anwenden könnten.

Ein winziger Federbalken

Das Rasterkraftmikroskop war von Binnig erfunden und gemeinsam mit Christoph Gerber vom Zürcher IBM-Labor und Calvin F. Quate von der Stanford University in den USA entwickelt worden. Wie das Rastertunnelmikroskop nutzt das Rasterkraftmikroskop ein völlig neues Vergrößerungsverfahren. Statt ein Objekt durch Licht- oder Elektronenlinsensysteme vergrößert abzubilden, führt das Rasterkraftmikroskop einen winzigen Federbalken (fachsprachlich Kantilever) über die Oberfläche der Probe. Auf dem äußersten Ende des Federbalkens sitzt eine winzige Spitze, die bis auf zwanzig Nanometer – einige hundert Atome – verjüngt ist. Während die Spitze über die winzigen Berge und Täler der Oberfläche wandert, wobei sie diese berührt oder extrem knapp darüber schwebt, übersetzt ein Computer die Ablenkung des Federbalkens in ein Bild. Im optimalen Fall sind darauf einzelne Atome zu erkennen.

Als Binnig Mitte der 1980er Jahre die ersten Bilder einzelner Silizium-Atome aufnahm, stieß die Spitze hin und wieder versehentlich in die Oberfläche und erzeugte im Silizium kleine Kerben. Das eröffnete sofort die Möglichkeit, ein Kraftmikroskop als Speichergerät in atomarem Größenmaßstab zu nutzen: eine Kerbe für eine Eins, keine Kerbe für eine Null. Doch auch die Schwierigkeiten waren offensichtlich. Da die Abtastspitze der Kontur des Trägermediums mechanisch folgen muss, kann das Abtasten nur sehr langsam vor sich gehen, verglichen mit der schnellen Rotation einer Festplatte oder mit der Nanosekunden-Schaltzeit von Transistoren.

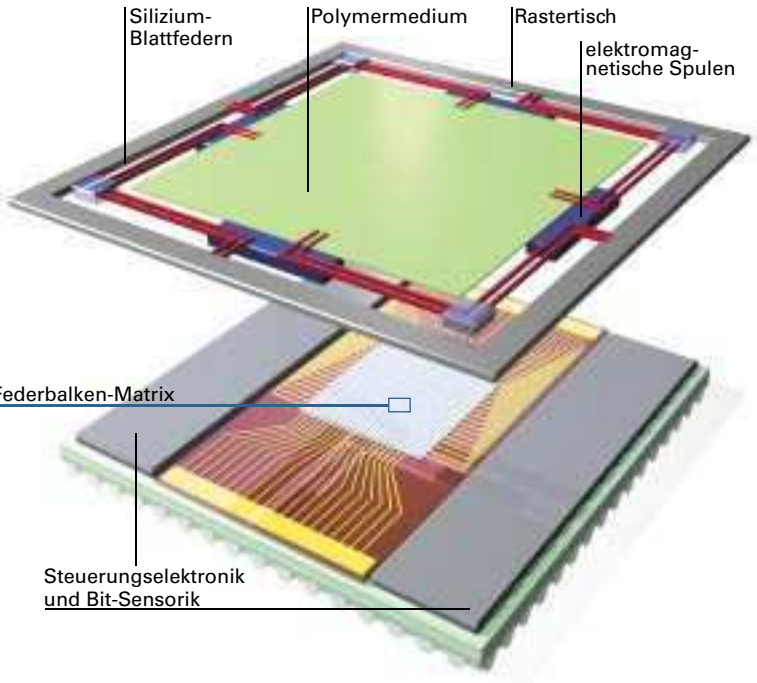
Bald zeigten sich weitere Vor- und Nachteile. Wegen der extrem kleinen Masse des Federbalkens arbeitet ein Rasterkraftmikroskop, dessen Spitze direkten Kontakt zum Medium hat, viel schneller als ein Rastertunnelmikroskop oder ein kontaktloses Kraftmikroskop – wenn auch immer noch nicht so schnell wie ein Magnetspeicher. Andererseits verschleißen die Spitzen eines Kontakt-Kraftmikroskops rasch, wenn sie Metall-

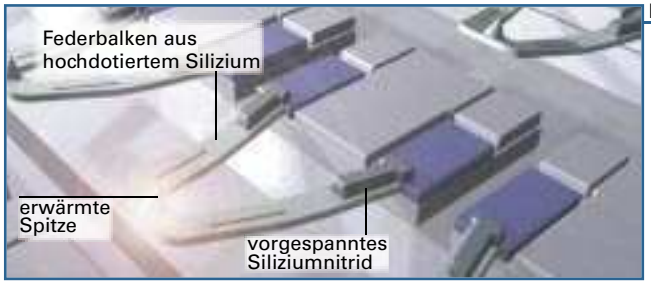
IN KÜRZE

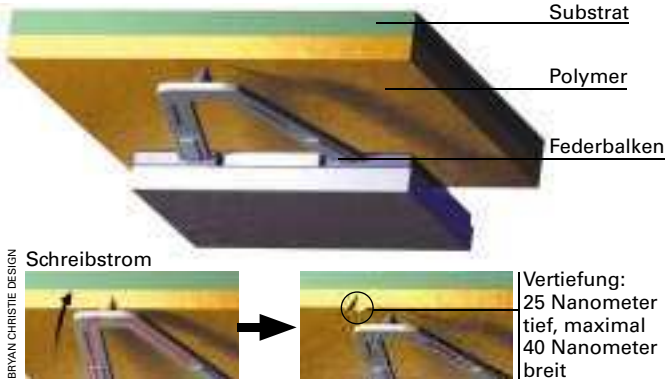
- Heutige Geräte zur digitalen Datenspeicherung werden bald an physikalische Grenzen stoßen. Einen Ausweg weist das **Nanolaufwerk**: ein mikromechanischer Apparat mit nanometergroßen Bauteilen.
- Das **Millipede-Projekt** verwendet ein Netz aus winzigen Federbalken, das Daten auf einem Polymermedium lesen, schreiben und löschen kann. Die Federspitzen stechen Vertiefungen in den Kunststoff, die einer digitalen Eins entsprechen; das Fehlen einer solchen Kerbe bedeutet eine Null.
- Die ersten Millipede-Produkte werden wahrscheinlich briefmarkengroße **Speicherkarten** für tragbare elektronische Geräte sein; sie könnten in drei Jahren auf den Markt kommen.

Wie ein Nanolaufwerk funktioniert

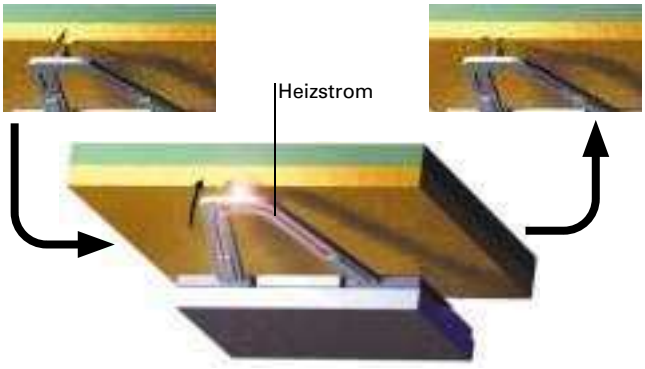
Der Millipede-Prototyp ähnelt einer Armee winziger Plattenspieler: 4096 feine Spitzen, die auf ebenso vielen winzigen Silizium-Federbalken sitzen, schreiben, lesen oder löschen Daten auf einem Polymermedium. Die aufwärts gerichteten Spitzen sind mit einer Kontrollelektronik verbunden, welche die in den analogen Vertiefungen kodierte Information in Ströme digitaler Bits umwandelt. Das Polymer hängt an Blattfedern aus Silizium in einem Rastertisch. Winzige Magnete (nicht gezeigt) und elektromagnetische Spulen verschieben das Speichermedium in konstantem Abstand über den Spitzen hin und her, vor und zurück. Wenn die Spitzen um weniger als ein tausendstel Millimeter nach oben gebogen werden, berühren sie den Kunststoff.





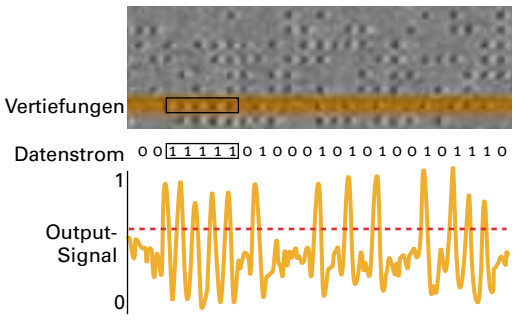


Schreiben eines Bits: Mittels Wärme und mechanischer Kraft erzeugen die Spitzen Vertiefungen, die digitalen Einsen entsprechen. Um eine Vertiefung zu produzieren, fließt Strom durch den Federbalken und erhitzt an seinem Ende eine dotierte Silizium-Region auf rund 400 Grad Celsius. Der vorgespannte Balken senkt die Spitze in das durch die Wärme aufgeweichte Polymer. Das Fehlen einer Vertiefung bedeutet eine Null.



Löschen eines Bits: Der neueste Millipede-Prototyp löscht ein vorhandenes Bit durch Erhitzen der Spitze auf 400 Grad Celsius und Erzeugen einer neuen Vertiefung direkt daneben; dadurch wird die alte Vertiefung eingeebnet (hier gezeigt). Eine andere Löschmethode besteht darin, die heiße Spitze kurz in eine vorhandene Vertiefung zu senken, wodurch der Kunststoff weich wird – die Vertiefung verschwindet.

Lesen eines Bits: Um Daten zu lesen, werden die Spitzen zunächst auf rund 300 Grad Celsius erhitzt. Wenn eine Abtastspitze in eine Vertiefung sinkt, wird Wärme in das Speichermedium abgeleitet. Dadurch sinkt die Temperatur des Federbalkens und damit auch geringfügig sein elektrischer Widerstand (unten). Ein digitaler Signalprozessor wandelt dieses kleine Output-Signal – oder seine Abwesenheit – in eine digitale Datenfolge um (rechts).



▷ oberflächen abtasten. Und vor allem: Wenn die Spitze erst einmal eine Kerbe hinterlassen hat, lässt sich diese nicht so einfach wieder »löschen«.

Eine Gruppe um Dan Rugar vom IBM Almaden Research Center in San José (Kalifornien) hatte versucht, die Spitze mit einem gepulsten Laserstrahl zu erwärmen. Das sollte den Kunststofffilm unter der Spitze erweichen und das Einkerben erleichtern. Die Almaden-Gruppe erzeugte auf diese Weise CD-ähnliche Aufnahmen, bei denen die Daten noch dichter gepackt waren als auf einer heutigen Digital Video Disc (DVD). Umfangreiche Haltbarkeitstests verliefen viel versprechend. Aber das System arbeitete zu langsam, und noch immer fehlte eine Methode, Daten zu löschen und neu zu schreiben.

Tausende von Abtastspitzen

Unser Team entwarf eine Konstruktion, die diesen Mängeln abhelfen sollte. Warum konnte man nicht, statt nur einen einzigen Federbalken zu verwenden, die Fähigkeit der Chiphersteller ausnutzen und Tausende oder gar Millionen identischer Bauteile auf einer fingernagelgroßen Siliziumscheibe platzieren? Wenn eine ganze Armee von langsamen Kraftmikroskop-Spitzen parallel tätig würde – wie die Beine eines Tausendfüßlers –, könnte sie sehr schnell Daten lesen oder schreiben.

Das war gewiss leichter gesagt als getan. Schon das Arbeiten mit einem einzelnen Atomkraftmikroskop ist manchmal schwierig. Wir waren dennoch überzeugt, dass ein massiv parallel arbeitendes Gerät mit zahlreichen Abtastspitzen eine echte Chance haben würde, zuverlässig zu funktionieren.

Zunächst brauchten wir irgendeine Datenlöschmethode, ob elegant oder nicht. Wir dachten, bessere Alternativen würden später schon auftauchen. Wir entwickelten ein Verfahren, große Bit-Felder zu löschen. Wir erhitzten sie bis oberhalb der Temperatur, bei der das Polymer zu fließen beginnt – ähnlich wie eine Wachsoberfläche, die bei Erwärmen mit einem Fön glatt wird. Obwohl das gut funktionierte, war die Prozedur etwas umständlich, denn vor dem Löschen eines Feldes mussten alle Daten, die man behalten wollte, in ein anderes Feld übertragen werden. Später schenkte uns die Natur eine viel bessere Methode – darüber gleich mehr.

Mit diesem groben Konzept im Kopf begannen wir ein interdisziplinäres Projekt. Schon indem wir beide in einem Team zusammenarbeiteten, schlugen wir eine Brücke zwischen zwei Abteilungen des Züricher IBM-Labors, die später zu einer einzigen Abteilung für Wissenschaft und Technologie zusammengelegt wurden. Bald schlossen sich uns Evangelos Eleftheriou und sein Team aus der Abteilung für Kommunikationssysteme an. Derzeit arbeiten außerdem mehrere Gruppen aus der internationalen IBM-Forschung und von Universitäten mit uns zusammen.

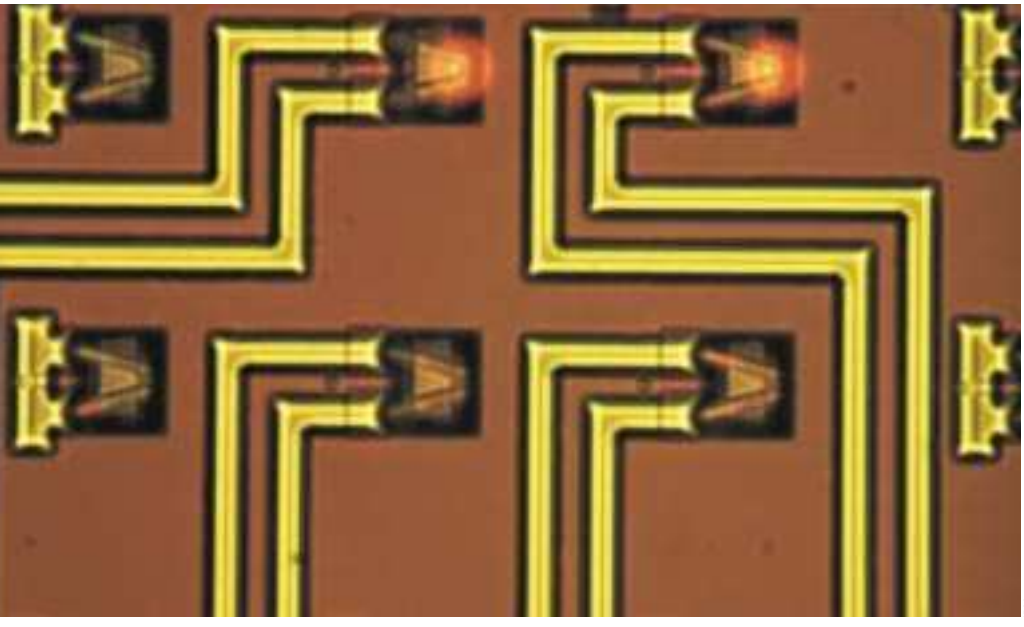
Wir waren keine Experten für mikroelektromechanische Systeme, und die Spezialisten für Mems- und Rastersondentechnik hielten unser Projekt für pure Spinnerei. Zwar forschten auch andere Teams – etwa die Gruppe von Quate in Stanford – an Datenspeichern nach der Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskop-Methode, aber wir waren die einzigen, die an der dichten Integration vieler Sonden auf einem Chip arbeiteten.

Das erste Hindernis: überlastete Verbindungsdrähte

Wir hofften, beim 11. Internationalen Workshop für Mikroelektromechanische Systeme des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) im Januar 1998 in Heidelberg einen funktionierenden Prototyp präsentieren zu können. Stattdessen brachten wir nur eine Vorstufe fertig: eine Matrix aus fünf mal fünf Abtastspitzen in einem 25 Quadratmillimeter großen Feld.

Unser Modell konnte zwar Daten parallel auslesen, aber nicht parallel schreiben. Wir hatten ein lästiges, aber entscheidendes Detail übersehen: Die zu den Heizpunkten führenden Metalldrähte waren für die durchfließenden Ströme zu dünn. Aufgrund der so genannten Elektromigration brannten sie sofort wie überlastete Sicherungen durch.

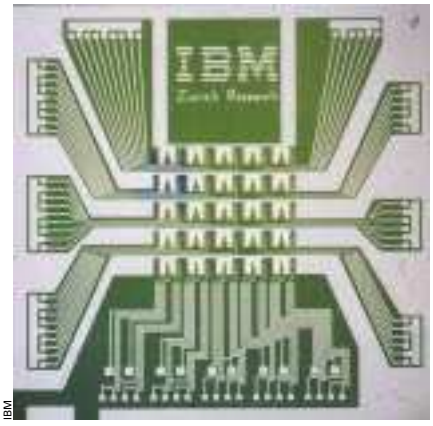
Elektromigration – die Beschädigung der extrem dünnen Leiterbahnen in Prozessoren durch den durchfließenden Strom – war in der Literatur ausführlich beschrieben worden, und wir hätten es wissen können. Das war nicht unser einziger Fehler, aber in unserer Gruppe werden Fehler schnell zugegeben und korrigiert. Trotz solcher Rückschläge konsta-



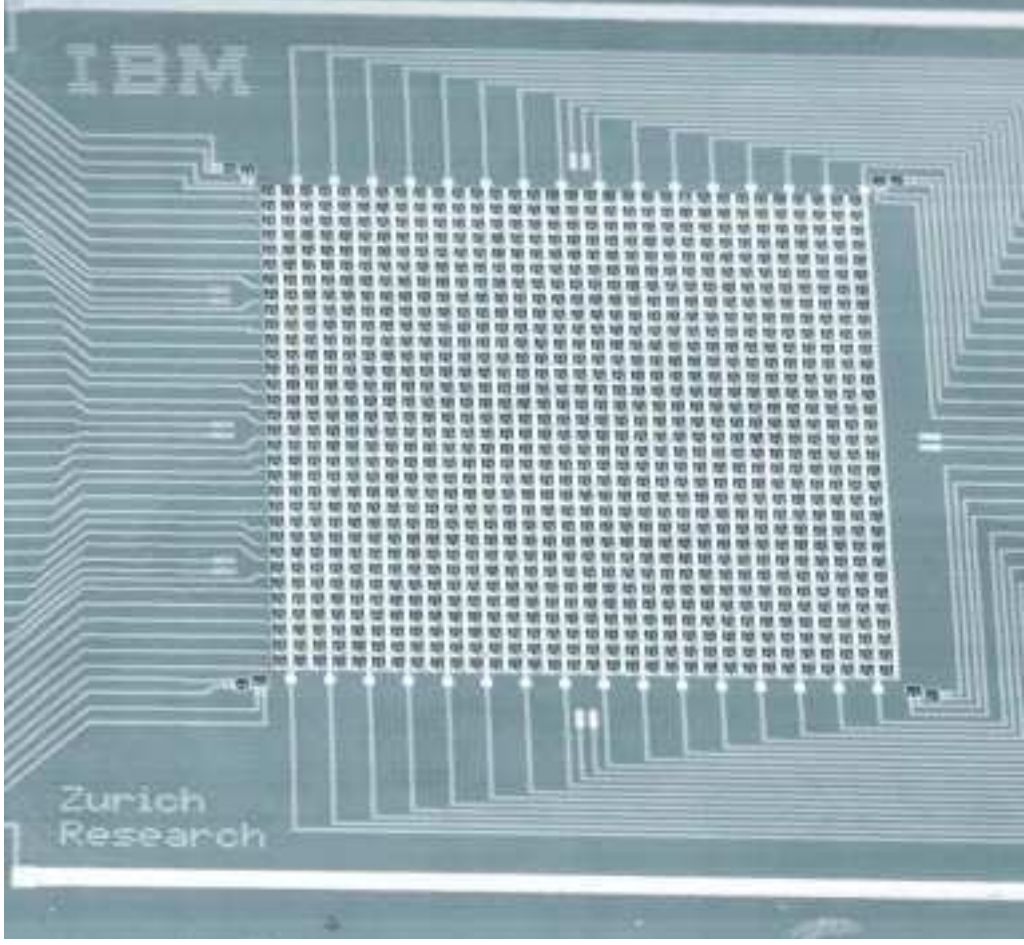
IBM

Der neueste Millipede-Prototyp zeigt unter dem Mikroskop Leiterbahnen, die paarweise zu den winzigen Federbalken des digitalen Tausendfüßlers führen.

Während der erste Millipede-Prototyp auf einem Quadrat von fünf Millimeter Kantenlänge 25 Federbalken enthielt (unten), umfasste der nächste Prototyp (rechts) bereits 1024 Federbalken in einem Quadrat von nur drei Millimeter Kantenlänge.



IBM



tierten unsere Laborleiter echten Fortschritt und erlaubten uns, das Team auf acht Personen zu verdoppeln. Wie uns die Erfahrung mit der 25-Spitzen-Matrix zeigte, war die Aluminiumverdrahtung zu störanfällig; wir ersetzten sie durch Federbalken aus stark dotiertem Silizium. Außerdem fanden wir heraus, dass wir über ein relativ großes Gebiet hinweg für einen sehr präzise gleich bleibenden Abstand zwischen Abtastspitzen-Ebene und Speichermedium sorgen konnten; das gab uns den Mut, gleich zu einer größeren Matrix überzugehen.

Als Vettiger einen Vortrag im IBM-Almaden-Labor hielt, fiel ihm ein ernstes Problem auf. Er beschrieb gerade, wie die Federbalken in regelmäßigen Zeilen und Spalten angeordnet werden sollten, alle verbunden mit einem Gitter aus elektrischen Drähten. Doch während er erklärte, wie das System funktionieren sollte, bemerkte er plötzlich, dass es so nicht ging. Nichts würde den elektrischen Strom daran hindern, überall gleichzeitig hinzufließen; auf diese Weise konnte es nie gelingen, ein Signal zuverlässig zu einem einzelnen Federbalken zu senden.

Unkontrollierter Stromfluss ist eigentlich ein wohl bekanntes Phänomen, wenn die Elemente einer Matrix durch Zeilen und Spalten angesteuert werden sollen. Die übliche Lösung ist, an jedem Element einen Transistorschalter anzubringen. Aber es ist unmöglich, Transistoren und Spitzen auf demselben Chip zu platzieren; die scharfen Spitzen müssen bei so hohen Temperaturen fabriziert werden, dass winzige Transistoren zerstört würden. Wir probierten im Labor alle möglichen Tricks, um den Stromfluss besser zu steuern, aber Vettiger verwarf sie alle. Je größer die Matrix, desto schlimmer wurde das Problem. Wie Urs Dürig aus unserem Team durch eine Überschlagsrechnung nachwies, lassen sich bei einer Matrix mit tausend Elementen die Federbalken gerade noch einzeln ansteuern, um Daten zu schreiben; doch das Auslesen der schwachen Einzelsignale muss fehlschlagen.

Bändigung der Stromflüsse

Das Problem ließ Vettiger keine Ruhe. Die Arbeitsgruppe wollte gerade das Chip-Design für eine Matrix mit 1024 Spitzen abschließen, aber Vettiger bat sie, noch zu warten. Nach tagelangem Grübeln fanden Vettiger und Michel Despont eine praktikable Lösung: eine direkt neben jedem Federbalken angebrachte Schottky-Diode. Dieser Gleichrichter – eine Art elektrische Einbahnstrasse – sollte verhindern, dass unerwünschte Ströme zu allen anderen Federbalken flossen. Wir überarbeiteten das Design und stellten bald eine Matrix mit 32 mal 32 Spitzen fertig.

Dieser zweite Prototyp bewies, dass unsere Ideen Hand und Fuß hatten. Alle 1024 Federbalken der Matrix waren funktionsfähig und krümmten sich gerade so weit aufwärts, dass sie exakt die passende Kraft auf das darüber liegende Speichermedium ausübten – ein weiches Polymermedium namens PMMA, das auf einem separaten Chip, dem so genannten Rastertisch, montiert war. Elektromagnetische Kupferspulen an den Rändern des Rastertisches verschoben die PMMA-Oberfläche knapp über den Spitzen nach links und rechts sowie vor und zurück, ohne dass die Speicherfläche in Schieflage geriet und unbeabsichtigt die Spitzen berührte. Jeder Federbalken war fünfzig Mikrometer (tausendstel Millimeter) lang und trug an seinem Ende einen kleinen elektrischen Widerstand. Wurde ein elektrischer Puls durch die Spitze geschickt, so erhitzte er sie für einige Mikrosekunden auf ungefähr 400 Grad Celsius.

Die ersten Ergebnisse mit unserem zweiten Prototyp waren ermutigend. Mehr als achtzig Prozent der 1024 Federbalken arbeiteten sofort zuverlässig; nur durch das Zentrum des Speicherfeldes zog sich eine schmale Fehlerzone, die von einer Verbiegung des Chips bei der ▷

▷ Montage herrührte. In unseren kühnsten Träumen hatten wir in dieser frühen Phase des Projekts keinen solchen Erfolg erwartet.

Im Chip mit fünf mal fünf Spitzen trug jeder Federbalken an seiner Basis einen Piezo-Widerstandssensor, der mechanische Spannung in eine Änderung des elektrischen Widerstands umwandelte; dadurch konnte das System registrieren, wann die Spitze in eine Grube gefallen war – eine digitale Eins. Um die Vertiefungen zuverlässiger nachzuweisen, experimentierten wir mit Schottky-Dioden in den Federbalken und hofften, die Verformung würde ihren elektrischen Widerstand ändern.

Zwar hatten die Dioden nicht die erwarteten Eigenschaften, aber dennoch beobachteten wir ein starkes Signal, wenn die Spitze ein Bit aufspürte. Nach einigem Kopfzerbrechen fanden wir zu unserer Überraschung, dass ein thermisches Phänomen dahinter steckte. Wenn der Federbalken auf 300 Grad vorgeheizt wird, reicht das zwar noch nicht, um eine Vertiefung zu erzeugen, aber sein elektrischer Widerstand fällt deutlich, sobald die Spitze in eine bereits vorhandene Vertiefung sinkt (siehe Kasten Seite 93).

Lesen und Speichern von Daten mittels Wärme

Wir wären niemals auf die Idee gekommen, einen thermischen Effekt zur Messung einer Bewegung, Ablenkung oder Position zu nutzen. Bei normalen Größenordnungen wäre diese Methode aufgrund der Wärmekonvektion – der Luftzirkulation zwischen Objekten unterschiedlicher Temperatur – zu langsam und zu ungenau. Doch zwischen mikroskopischen Objekten gleichen sich Temperaturdifferenzen binnen Mikrosekunden aus.

Dieses unerwartete Ergebnis kam uns sehr gelegen. Nun konnten wir auf jedem Federbalken dieselbe Heizung sowohl zum Lesen als auch zum Schreiben verwenden. Anstelle von drei oder vier Drähten pro Federbalken brauchten wir nur zwei.

Wir präsentierten diesen zweiten Prototyp auf der IEEE-Mems-Konferenz im Jahre 1999. Diesmal waren die anwesenden Forscher stärker beeindruckt. Aber was die IBM-Spitzenmanager am meisten begeisterte, waren Bilder von regelmäßigen Vertiefungszeilen, die Millipede in das Polymer geschrieben hatte. Zwischen den Vertiefungen lagen nur vierzig Nanometer; das entsprach einer dreißigmal höheren Speicherdichte als bei den besten Festplatten-Laufwerken, die damals auf dem Markt waren.

Kurz darauf, Anfang 2000, änderte das Millipede-Projekt seinen Charakter. Wir konzentrierten uns stärker auf die Herstellung eines Speichersystem-Prototyps. Die Arbeitsgruppe wuchs auf ein rundes Dutzend. Eleftheriou und sein Team steuerten ihr Fachwissen über Aufnahmetechnik bei, das sie erfolgreich für Magnetaufzeichnung angewandt hatten. Sie begannen, die Elektronik für einen funktionsfähigen Prototyp zu entwickeln – von der einfachen Signalverarbeitung und Fehlerkorrektur bis zur kompletten Systemarchitektur und -steuerung.

Wir hatten gerade eine Methode zum Löschen kleiner Flächen entdeckt, und mit Eleftheriou konnten wir daraus ein System entwickeln, das vor dem Überschreiben keinen Löschvorgang mehr erfordert. Bei der neuen lokalen Löschmethode muss nur die Temperatur der Spitze hoch genug sein, das Material aufzuweichen; dann schließt sich eine Vertiefung von selbst auf Grund der Oberflächenspannung und der Elastizität des Polymers. Statt ein größeres Feld durch eine in das Speichersubstrat eingebaute Heizung aufzuweichen wie bei der früheren Blocklöschmethode, wird das Medium durch die Spitze selbst örtlich erhitzt. Dabei ist wegen elektrostatischer Kräfte eine gewisse Anpresskraft auf die Spitze nicht zu vermeiden. Wenn die Vertiefung ausreichend erhitzt wird und eine neue Kerbe erzeugt, werden gleichzeitig ältere Bits in der nächsten Umgebung gelöscht. Beim Schreiben einer dichten Zeile von Vertiefungen löscht jedes neu erzeugte Bit seinen Vorgänger, und nur das letzte Bit in der Zeile bleibt übrig. Dieser Mechanismus kann dazu dienen, alte Daten ohne Kenntnis ihres Inhaltes mit neuen zu überschreiben. Durch Kombination unserer Physik-Kenntnisse mit Eleftherious Wissen über Aufnahmetechnik entwickelten wir eine spezielle Kodierung für direktes Überschreiben.

Hürdenlauf zum Konsumenten

An diesem Punkt wurde klar, dass wir die Geschwindigkeit und den Energieverbrauch von Millipede verbessern mussten. Es galt, Signal-Rausch-Verhältnisse, Bitfehlerraten und andere Indikatoren für die Qualität des Speichervorgangs zu messen. Außerdem mussten wir dem Nanolaufwerk eine Größe und Form geben. Der »Formfaktor« kann auf dem Markt für Unterhaltungselektronik entscheidend sein – insbesondere bei tragbaren Geräten, die wir als Erstes anvisieren wollten.

Gegen Ende 2002 legten wir letzte Hand an den Prototyp der dritten Generation: 4096 Spitzen in einer Matrix von 64 mal 64 Federbalken, das Ganze in ein Quadrat von 6,4 Millimeter Kantenlänge gepackt. Gegenwärtig könnten wir sogar Chips mit einer Million Federbalken fabrizieren, und aus einem üblichen Silizium-Wafer mit 200 Millimeter Durchmesser könnten 250 solche Chips hergestellt werden. Nun geht es um die richtige Balance zwischen zwei Wunschzielen. Erstens sollte unser komplettes Nanolaufwerk – nicht nur Matrix und Rastertisch, sondern auch vollständig integrierte Steuerungselektronik – sich mit seinem Preis und Energieverbrauch auf dem Markt für tragbare Geräte behaupten. Zweitens ist entscheidend, dass das

IBM

Der durch die beiden Federbalken in der Bildmitte geleitete Strom erhitzt deren Spitze auf mehrere Hundert Grad.

Das Millipede-Projekt von IBM ist nur einer von mehreren Versuchen, kompakte Computerspeicher hoher Leistung auf den Markt zu bringen.

Projekte für Speicher hoher Dichte

Unternehmen	Gerätetechnik	Speicherkapazität	Marktreife
Hewlett-Packard (Palo Alto, Kalifornien)	kompakte Rasterkraftmikroskope, die Elektronenstrahlen zum Schreiben und Lesen von Daten nutzen	mindestens ein Gigabyte (GB) im Anfangsstadium	Ende des Jahrzehnts
Hitachi (Tokio, Japan)	Rasterkraftmikroskop-Technik; Details nicht veröffentlicht	nicht veröffentlicht	nicht veröffentlicht
Nanochip (Oakland, Kalifornien)	Matrix aus Rasterkraftmikroskop-Sonden, die Daten auf einem Siliziumchip speichern	anfangs 0,5 GB, später bis zu 50 GB	erwartet für 2004
Royal Philips Electronics (Eindhoven, Niederlande)	optisches System, ähnlich einer beschreibbaren CD; nutzt blauen Laser zum Schreiben und Lesen auf einer drei Zentimeter großen Scheibe	bis zu 1 GB pro Seite, wahrscheinlich 4 GB insgesamt	erwartet für 2004
Seagate Technology (Scotts Valley, Kalifornien)	wiederbeschreibbares System mit Rasterkraftmikroskop- oder anderer Methode; arbeitet auf einem zentimetergroßen Chip	bis zu 10 GB auf einem Chip für tragbare Geräte	erwartet für 2006 oder später

System selbst nach jahrelangem Gebrauch zuverlässig funktioniert.

Wir haben Polymere gefunden, die noch besser funktionieren als PMMA. In diesen Kunststoffen bleiben die Vertiefungen anscheinend mindesten drei Jahre lang stabil, und ein einzelner Punkt der Matrix kann mindestens 100 000-mal beschrieben und gelöscht werden. Mehr Sorge bereitet uns, wie gut die Spitzen das Erzeugen von 100 Milliarden Vertiefungen über mehrere Betriebsjahre hinweg aushalten. Dürig und Bernd Gotsmann aus unserer Gruppe arbeiten eng mit Kollegen im IBM-Almaden-Labor zusammen, um Polymere zu modifizieren oder neu zu entwickeln, die unseren Anforderungen an Speichermedien genügen.

Obwohl das menschliche Auge auf einem Bild des Millipede-Speichers leicht zu erkennen vermag, welche Blöcke in der Matrix Vertiefungen enthalten und welche nicht, ist es keineswegs leicht, einfache elektronische Schaltkreise zu entwickeln, die dasselbe leisten. Welche Punkte Nullen und welche Einsen repräsentieren, lässt sich viel einfacher feststellen, wenn alle Kerben gleich tief sind und in gleichem Abstand auf exakten Geraden liegen.

Ein Tisch mit Federbeinen

Das bedeutet: Der Rastertisch muss perfekt eben sein, überall gleichen Abstand zu den Spitzen halten und mit konstanter Geschwindigkeit verschoben werden – und das alles mit einer Toleranz von wenigen Nanometern. Wie wir erst kürzlich herausgefunden haben, kann die Bewegung des Rastertisches viel besser kontrolliert werden, wenn er an dünnen Blattfedern aus Silizium hängt. Außerdem werden wir ein aktives Rückkopplungssystem einbauen, das unerwünschte Positionsänderungen der beiden Systemteile – während das Gerät etwa am Gürtel eines Läufers baumelt – sofort korrigiert.

Jedes mechanische System, das wie Millipede Wärme erzeugt, muss mit thermischer Ausdehnung fertig werden. Wenn die Temperatur des Polymermediums und die der Federbalken um mehr als ein einziges Grad Celsius voneinander abweichen, liegen die Bits nicht mehr genau unter den Spitzen. Ein Rückkopplungssystem zur Kompensation solcher Abweichungen würde die Komplexität und somit die Kosten erhöhen. Wir sind uns noch nicht über die beste Lösung im Klaren.

Glücklicherweise kommt uns die Natur wieder ein wenig entgegen. Sowohl Millipede als auch das Speichersubstrat, das den Polymerfilm trägt, bestehen aus Silizium und dehnen sich deshalb bei gleicher Temperatur gleich stark aus. Außerdem ist der Abstand zwischen Spitzenmatrix und Trägermaterial so klein, dass die Luft im winzigen Zwischenraum als hervorragender Wärmeleiter wirkt und Temperaturdifferenzen sofort ausgleicht. Da das Projekt nun den Kinderschuhen entwachsen ist und wir die ersten Schritte in Richtung Produktentwicklung gehen, trat Thomas A. Albrecht unserem Team bei. Er ist Spezialist für Datenspeicher und hat am Almaden-Labor die kleinste IBM-Festplatte namens Mikrodrive bis zur Marktreife betreut. Eine vergleichbare Reise aus dem Labor bis zum Kunden könnte Millipede in den nächsten Jahren bevorstehen.

Noch können wir nicht wissen, ob das Millipede-Programm ein kommerzielles Produkt ergeben wird. Obwohl wir Wissenschaftler Millipede nicht mehr für sehr riskant halten, jubeln wir dennoch, wenn ein neuer Prototyp funktioniert. Falls wir Glück haben, werden unsere neuesten Prototypen Probleme aufwerfen, die unser Team zu lösen vermag. Auf jeden Fall finden wir es aufregend, das diese nanomechanische Technologie Forschern erstmals erlauben könnte, einen Quadratzentimeter mit fast atomarer Auflösung abzutasten. Bisher sind aus dem Projekt an die dreißig recht grundlegende Patente hervorgegangen. Selbst wenn das Nanolaufwerk kein kommerzieller Erfolg werden sollte, ist es eine völlig neuartige Maschine, die für irgendwas taugen wird – und das ist uns Belohnung genug. ◁

Peter Vettiger ist Spezialist für Mikro- und Nanofertigung. Er kam 1963 zum IBM-Forschungslabor Zürich und schloss 1967 sein Studium als Elektroingenieur an der Höheren Technischen Lehranstalt in Zürich ab. 2001 verlieh ihm die Universität Basel die Ehrendoktorwürde. **Gerd Binnig** promovierte 1978 in Physik an der Universität Frankfurt am Main und kam im selben Jahr zum Zürcher IBM-Labor. 1986 erhielt er für die Erfindung des Rastertunnelmikroskops zusammen mit Heinrich Rohrer den Nobelpreis für Physik.

The »Millipede« – Nanotechnology Entering Data Storage. Von P. Vettiger et al. in: IEEE Transactions on Nanotechnology, Bd. 1, S. 39 (2002).

In Touch with Atoms. Von Gerd Binnig und Heinrich Rohrer in: Reviews of Modern Physics, Bd. 71, S. S324 (1999).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Geziefer

Die Zeit ist reif für ein wenig Bescheidenheit. Denn so manche Mikrobe kann unsere neuronalen Schaltkreise besser beeinflussen als wir.

Von Robert Sapolsky

Genau wie die meisten anderen Wissenschaftler besuche ich hin und wieder Fachkonferenzen. So auch die Jahrestagung der Gesellschaft für Neurowissenschaften, einer weltweiten Vereinigung von Hirnforschern. Diese Veranstaltung gehört zu den wohl größten intellektuellen Herausforderungen, die man sich vorstellen kann. Rund 28 000 Fachidioten wie ich quetschen sich in ein einziges Konferenzzentrum. Nach einer Weile kann einen diese Zusammenkunft in den Wahnsinn treiben: Eine ganze Woche lang stößt man in jedem beliebigen Restaurant, jedem Fahrstuhl oder jeder Toilette auf Leute, die in angeregte Diskussionen über Tintenfisch-Axone vertieft sind.

Kein bisschen angenehmer ist es, sich bei der eigentlichen wissenschaftlichen Veranstaltung zurechtzufinden. Ganze 14 000 Vorträge und Posterpräsentationen werden bei der Tagung angeboten – ein absolut überwältigendes Informationsüberangebot. Viele Poster, die dir wichtig sind, bekommst du nicht einmal zu sehen, weil dir die enthusiastische Menschenmasse davor die Sicht versperrt. Die eine Präsentation ist in einer Sprache gehalten, die du nicht einmal kennst, und die nächste stellt unvermeidlich jedes einzelne Experiment vor, das du selbst für die nächsten fünf Jahre geplant hast. Und über all dem schwebt die gemeinsame Erkenntnis, dass – obwohl Myriaden Hirnforscher sich abmühen – wir noch immer nicht den leisesten Schimmer haben, wie das Gehirn funktioniert.

An meinen absoluten Tiefpunkt gelangte ich bei der letzten Konferenz, als ich an einem Nachmittag – erschlagen von der Informationsflut und frustriert vom Gefühl allgemeiner Unwissenheit – auf der Treppe vor dem Konferenzzentrum saß. Ich starrte in eine trübe Pfütze im Rinnstein und mir wurde klar, dass das darin wimmelnde mikroskopisch kleine Geziefer wahrscheinlich mehr über das Gehirn weiß als alle Neurowissenschaftler zusammen.

Meine zerknirschte Einsicht lässt sich auf eine unlängst publizierte, ganz hervorragende wissenschaftliche Arbeit zurückführen. Sie dreht sich darum, wie bestimmte Parasiten das Gehirn ihrer Wirte kontrollieren können. Es ist ja weitläufig bekannt, dass Bakterien, Einzeller und Viren über erstaunlich ausgeklügelte Möglichkeiten verfügen, menschliche und tierische Körper für ihre eigenen Zwecke zu missbrauchen. Um selbst gedeihen zu können, dringen sie oft bis in unsere Zellen vor und berauben uns unserer Lebensenergie und unserer Lebensqualität.

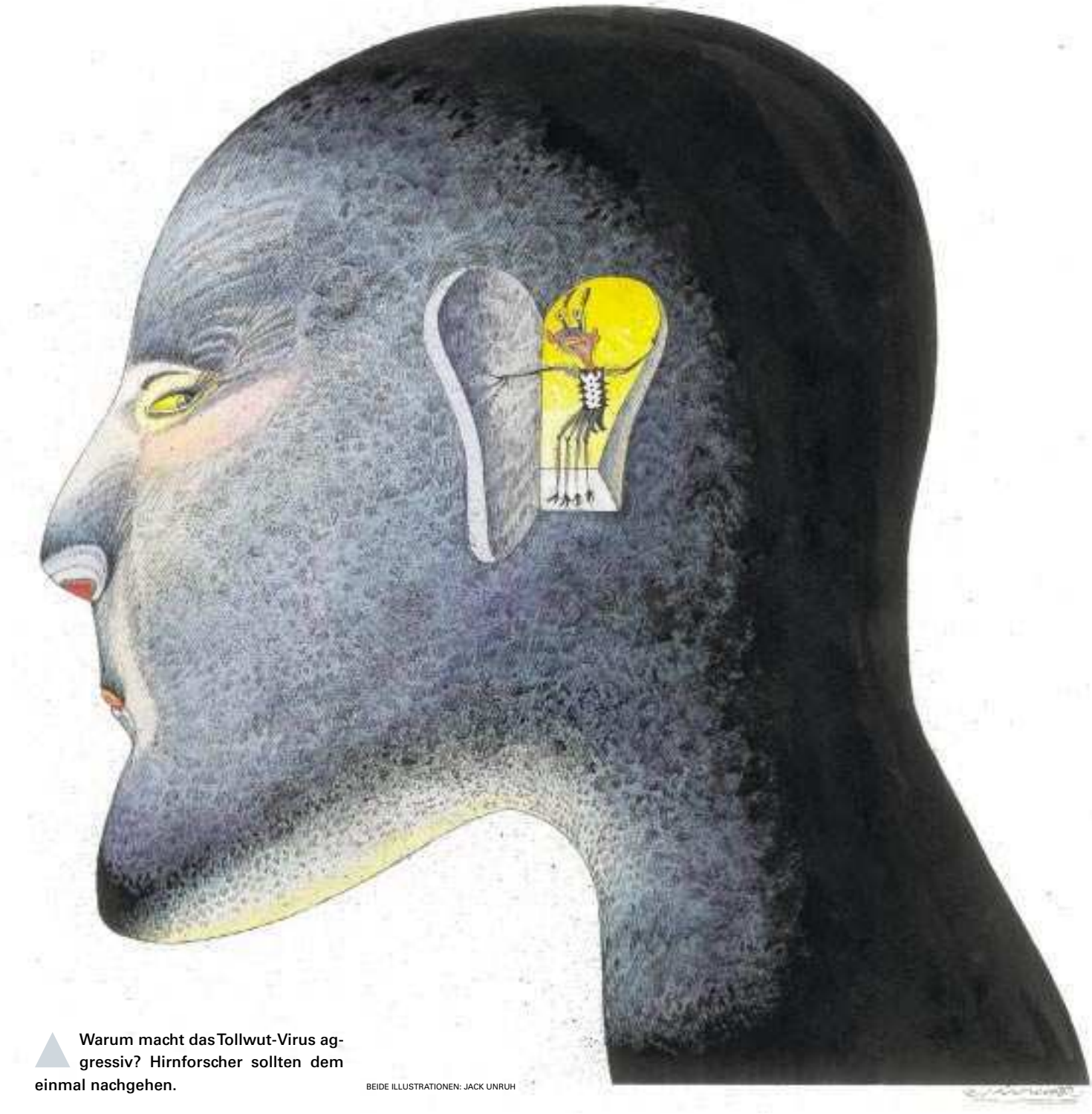
Männer zu Müttern machen

Doch das Verblüffendste und Teuflischste, was diese Parasiten entwickelt haben – und worum an jenem Tag auch meine Gedanken kreisten –, ist die Fähigkeit, selbst das Verhalten ihres Wirtes zu ihrem eigenen Vorteil zu manipulieren. Das fängt schon bei den allseits bekannten Außenparasiten an wie Flöhen, Milben oder Läusen. Da wäre etwa eine Milbenart zu nennen, die auf dem Rücken von Ameisen »reitet« und ihnen gelegentlich auf den Kopf klopft. Dies löst beim Reittier einen Reflex aus: Es speit seine Nahrung wieder aus und die Milben machen sich munter darüber her. Ebenso manipulieren auch Innenparasiten ihren Wirt, wie zum Beispiel eine bestimmte Fadenwurmart der Gattung *Syphacia*, die im Darm von Nagetieren lebt. Die Wurmweibchen legen ihre Eier im Afterbereich ab. Wo immer diese Eier dann auf der Haut landen, produzieren sie ein juckendes Sekret – worauf der Nager beginnt, sich an dieser Stelle mit den Zähnen zu kratzen und dadurch die Eier ins Körperinnere zu transportieren, wo die Würmer dann in Ruhe schlüpfen können.

Bei den genannten Beispielen beruhen die Verhaltensänderungen darauf, dass der Wirt so lange geärgert wird, bis er etwas macht, was dem Schmarotzer nützt. Doch einige Parasiten können sogar die Funktion des Nervensystems selbst verändern. Manchen gelingt dies auf indirektem Wege: Sie manipulieren die Hormone, die auf das Nervensystem wirken. So heftet sich ein australischer Wurzelkrebs *(Sacculina granifera)* an die Männchen einer größeren Krebsart und sondert ein »verweiblichendes« Hormon ab, das mütterliche Verhaltensweisen hervorruft: Die »umgepolten« Männchen ziehen dann zusammen mit den Weibchen aus und graben Kuhlen zur Eiablage in den Sand. Natürlich legen die Männchen keine Eier – wohl aber die Wurzelkrebse. Erwischen die Parasiten übrigens ein weibliches Opfer, rufen sie den gleichen Grabreflex hervor – allerdings erst, nachdem sie die Eierstöcke der Wirtin haben verkümmern lassen. Fachleute sprechen von einer parasitären Kastration.

So bizarr diese Fälle auch anmuten, bleiben die Parasiten hier wenigstens außerhalb des Gehirns. Doch einige mikro- ▷

im Gehirn



Warum macht das Tollwut-Virus aggressiv? Hirnforscher sollten dem einmal nachgehen.

BEIDE ILLUSTRATIONEN: JACK UNRUH

▷ skopisch kleine Organismen – meistens Viren, neben denen Milben, Fadenwürmer oder Wurzelkrebse geradezu riesig erscheinen – gelangen sogar dort hinein. An diesem sicheren Hort bleibt solch ein winziger Parasit von den Attacken des Immunsystems weitgehend verschont und kann in Ruhe die neuronale Maschinerie zu seinem eigenen Zweck »umprogrammieren«.

Nach diesem Muster arbeitet etwa das Tollwut-Virus. Obwohl die Tollwut seit Jahrhunderten bekannt ist, wurde sie – soweit ich weiß – noch nie unter neurobiologischem Aspekt betrachtet. Ich will versuchen, das an dieser Stelle zu tun. Theoretisch hätte das Tollwut-Virus im Laufe seiner evolutionären Entwicklung mehrere Möglichkeiten gehabt, seine Übertragung von Wirt zu Wirt zu sichern. Der Weg über das Gehirn war also nicht zwingend. So hätte es einen ähnlichen Trick anwenden können wie Schnupfenerreger: Diese reizen die Nervenenden in der Nasenhöhle, wodurch wir niesen müssen und Virusnachkommen in alle Richtungen versprühen – etwa zu unserem Vordermann im Kino. Oder das Virus hätte den unwiderstehlichen Drang auslösen können, eine andere Person oder ein Tier zu lecken, um dabei die Erreger mit dem Speichel zu übertragen. Stattdessen macht das auch im Speichel enthaltene Tollwut-Virus seinen Wirt bekanntlich aggressiv und gelangt über Bisswunden in sein neues Opfer.

Wenn die Katze nicht mehr die Maus schreckt

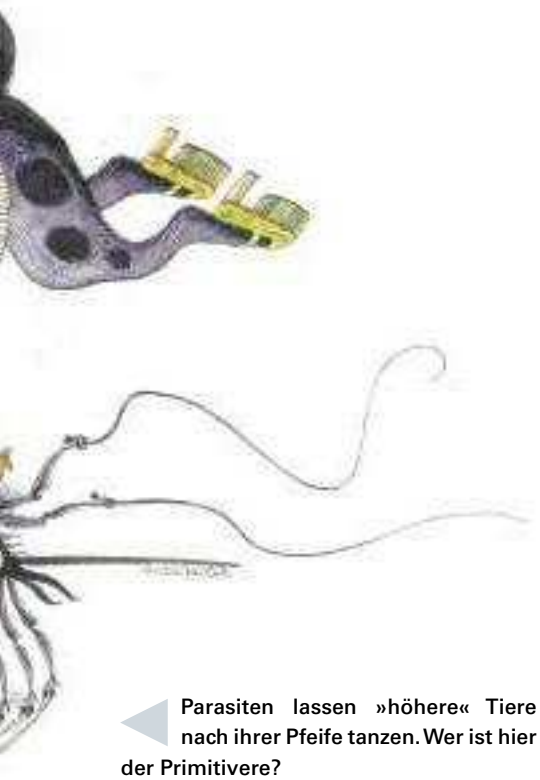
Man führe sich das vor Augen. Legionen von Hirnforschern untersuchen die neuronalen Grundlagen der Aggression: beteiligte Hirnbahnen und Botenstoffe, Wechselwirkung zwischen Genen und der Umwelt, Neuromodulationen durch Hormone und so weiter. Um Aggression drehen sich Konferenzen, Doktorarbeiten und kleinliches akademisches Gezänk, aber auch aufreibende Debatten in Büro und Alltag. Doch das Tollwut-Virus hat dabei die ganze Zeit über einfach »gewusst«, welche Neuronen es infizieren muss, um sein Opfer tollwütig zu machen. Und meines Wissens hat noch kein Neurowissenschaftler versucht, die Tollwut als Modell für das neurologische Verständnis der Aggression zu verwenden.

So eindrucksvoll diese viralen Effekte auch sind – eine Steigerung ist immer noch drin. So geht das Tollwut-Virus recht unspezifisch vor: Ein tollwütiges Tier könnte eines der wenigen anderen Lebewesen beißen, in denen sich das Virus nicht gut vermehren kann – etwa ein Kaninchen. Obwohl also die Verhaltensänderungen, die durch die Infektion im Gehirn hervorgerufen werden, schon recht verblüffend sind, kann die Virusübertragung in einer Sackgasse enden.

Dies führt uns zu einem ganz besonders raffinierten Fall und damit auch zu der eingangs erwähnten Arbeit von Manuel Berdoy an der Universität Oxford. Berdoy und sein Team untersuchten den parasitären Einzeller *Toxoplasma gondii*, den Erreger der Toxoplasmose. In einer idealen »Toxoplasma-Welt« gibt es nur zwei Arten von Wirten: Nagetiere und Katzen. Der Einzeller wird von einem Nager mit der Nahrung aufgenommen und erzeugt nach ungeschlechtlicher Vermehrung in dessen Körper Zysten – vor allem im Gehirn. Der Nager wiederum wird von einer Katze gefressen, in deren Körper sich der Toxoplasmose-Erreger dann geschlechtlich vermehren kann. Die Katze scheidet schließlich den Parasiten in seinem Zwischenstadium mit ihrem Kot aus, an dem nun wiederum ein Nager knabbert, womit sich der Kreislauf schließt.

Das gesamte Szenario ist abhängig von der Spezifität: Der Toxoplasmose-Erreger kann zwar eine ganze Reihe verschiedener Spezies infizieren, muss aber letztendlich immer in einer Katze landen. Denn nur dort kann er sich sexuell vermehren und mit den Ausscheidungen verbreiten. Deshalb kann der Erreger kein »Interesse« daran haben, dass sein Wirtsnager etwa von einem Falken gefressen wird oder dass sich Mistkäfer über den infizierten Katzenkot hermachen.

Die Fähigkeit des Toxoplasmose-Erregers, auch andere Arten zu infizieren, ist übrigens der Grund dafür, dass sich in fast allen Schwangerschaftsratgebern der Hinweis findet, die Katze samt Katzenklo aus dem Haus zu verbannen. Ebenso wird Schwangeren in Katzen-Haushalten von der Gartenarbeit abgeraten. Denn falls sich eine werdende Mutter mit Toxoplasmose-Erregern aus dem Katzenkot infiziert, können die Parasiten in den Fetus gelangen und in diesem neurologische Schäden verursachen. Deshalb machen gut informierte Schwangere einen großen Bogen um Katzen. Mit Toxoplasmose infizierte Nager hingegen zeigen die umgekehrte Reaktion: Der Parasit vollbringt das Kunststück, die scheuen Nager gegenüber ihrem Räuber zutraulich zu machen.



Parasiten lassen »höhere« Tiere nach ihrer Pfeife tanzen. Wer ist hier der Primitivere?

Normalerweise gehen Nagetiere Katzen instinktiv aus dem Weg – ein angeborenes Verhalten. Diese Abneigung müssen sie nicht durch Versuch und Irrtum entwickeln (ein Irrtum würde wohl auch unweigerlich zu einem Ende als »Katzenfutter« führen). Stattdessen ist die Katzenphobie in ihren Gehirnen »fest verdrahtet« und wird durch Gerüche ausgelöst: genauer gesagt durch Pheromone, chemische Duftsignale, die von Tieren abgegeben werden. Nagetiere ziehen sich instinktiv zurück, sobald sie Katzen riechen, was sogar für Labormäuse gilt, die über Hunderte von Generationen keine Katze zu Gesicht bekommen haben. Eine Ausnahme machen indes Nager, die mit Toxoplasmose infiziert sind, wie Berdoy und seine Mitarbeiter herausfanden: Die Tiere verlieren selektiv ihre Scheu und Angst vor Katzen-Pheromonen.

Fatale Anziehung

Nun ist es aber nicht so, dass der Parasit im Kopf seines Zwischenwirtes herumspukt und ihn deshalb wirr und verletzlich macht. Mit den Tieren scheint sonst alles in bester Ordnung: Ihr Sozialstatus innerhalb der Hierarchie ändert sich nicht, und sie bleiben sexuell aktiv, bekunden also de facto ihr Interesse an den Pheromonen des anderen Geschlechts. Demnach können die infizierten Nager nach wie vor andere Gerüche unterscheiden. Nur eben vor Katzen-Pheromonen schrecken sie nicht mehr zurück.

Das ist schlichtweg verblüffend. Man stelle sich zum Vergleich einen Mann vor, dessen Gehirn von Parasiten befallen wurde. Die Infektion hat keinerlei Einfluss auf seine Gedanken und Gefühle oder auf seinen Intelligenzquotienten. Auch seine Vorlieben für bestimmte Fernsehserien bleiben gleich. Doch damit der ungebetene Gast im Gehirn seinen Lebenszyklus vollenden kann, verspürt der Mann den unwiderstehlichen Drang, in den Zoo zu gehen, über den Zaun des Eisbärengeheges zu klettern und dem grimmigsten aller Bären einen Zungenkuss zu geben. Denn der Mann leidet an einer »parasiteninduzierten tödlichen Anziehung«, wie Berdoy und seine Kollegen es im Titel ihrer Arbeit nennen.

Offensichtlich ist hier weitere, tiefer gehende Forschung nötig. Das schreibe ich nicht nur, weil es am Ende fast jeden Fachartikels so steht, sondern weil diese Beobachtung einfach derart verblüfft, dass unbedingt jemand herausfinden muss, was da genau passiert. Und weil sie einmal mehr beweist, dass die Evolution etwas Faszinierendes ist. Faszinierend – und völlig entgegen unserer Vorstellung. So sind doch die meisten Menschen der festen Überzeugung, die Evolution strebe zielgerichtet nach Höherem: Wirbellose Tiere seien primitiver als Wirbeltiere, Säugetiere die am weitesten entwickelten Wirbeltiere, Primaten die genetisch ausgeklügeltsten Säugetiere und so weiter. Selbst einige meiner besten Studenten fallen immer wieder darauf herein – so sehr ich auch in meinen Vorlesungen auf sie einrede. Wer aber diesem Denkmuster aufsitzt, irrt nicht nur, er ist darüber hinaus nur ein winziges Stück von der Philosophie entfernt, die auch der Menschheit eine zielgerichtete Evolution unterstellt – mit dem Nordeuropäer und seiner Vorliebe für Schnitzel und Stechschritt als vorläufiger Krone der Schöpfung!

Rufen wir uns also ins Bewusstsein, dass es in der Welt da draußen Kreaturen gibt, die Gehirne kontrollieren können. Mikroskopisch kleine oder auch etwas größere Organismen, die mehr Macht haben als Big Brother und – jawohl – selbst als Neurowissenschaftler. Mein Gedankenspiel beim Blick in eine Straßenpfütze führte mich also zum völligen Gegenteil dessen, was Narziss aus der Betrachtung seines Spiegelbildes im Wasser folgerte: Etwas mehr Bescheidenheit im Hinblick auf unsere Stammesgeschichte würde uns gut zu Gesicht stehen. Denn wir sind ganz bestimmt nicht die am weitesten entwickelte Spezies auf Erden. Oder die am wenigsten verwundbare. Oder auch nur die klügste. ◁

Robert Sapolsky ist Professor für Biologie und Neurologie an der Universität Stanford, Kalifornien, und wissenschaftlicher Mitarbeiter des Nationalmuseums von Kenia in Nairobi. Sein wissenschaftliches Interesse gilt unter anderem dem Neuronensterben, der Gentherapie und der Physiologie der Primaten.

Parasites and the Behavior of Animals. Von Janice Moore, Oxford University Press, 2002.

Fatal Attraction in Rats infected with Toxoplasma gondii. Von M. Berdoy, J. Webster und D. Macdonald in: Proceedings of the Royal Society of London, B 267, S. 1591 (2000).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

M-PORE GMBH

Schwammiges Metall

Poren und Kanäle statt massiver Substanz verringern das Gewicht metallener Bauteile und verleihen ihnen neue Eigenschaften.

Warum sind Knochen so leicht und doch stabil? Das Geheimnis dieser »Biotechnologie« ist die poröse Struktur des Materials. Seit wenigen Jahren gibt es Produkte aus Metallen, die wie ein gefrorener Schaum oder Schwamm aufgebaut sind und somit vergleichbare Eigenschaften aufweisen. Das Dresdner Unternehmen M-Pore fertigt poröse Metalle in beliebigen Formen, die extrem stabil sind und neunzig Prozent weniger wiegen als Bauteile aus dem vollen Material. Geschäftsführer Dieter Girlich sieht enormes Potenzial vor allem in der Automobilindustrie, wo jedes Gramm zählt.

Bislang ist dort Aluminium Trumpf. »Wir sparen dagegen Gewicht mit einem besonderen Gussverfahren.« Wenige Millimeter dicke Kanäle durchziehen den Schaum, verbinden die Poren und bilden so eine offene Struktur. Diese unterscheidet den Werkstoff von den schon am Markt etablierten aufgeschäumten Metallen: In denen sind voneinander isolierte Luftblasen eingeschlossen.

»Wir können das nicht nur mit Aluminium, sondern mit allen Metallen oder Legierungen machen, die gussfähig sind.« Die Ingenieure können deshalb sogar weitere Funktionen in einem Bauteil verwirklichen. In einem chemischen Reaktor könnte das Material etwa filtrieren, Wärme tauschen und mit einer entsprechenden Beschichtung zugleich als Katalysator wirken.

Alte Technik für neue Technologie

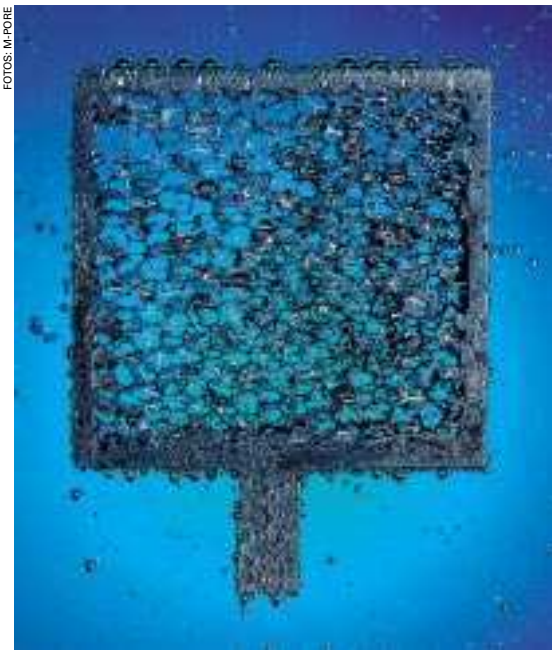
So variantenreich die Einsatzmöglichkeiten, so komplex ist die Herstellung. »Wir verarbeiten mehrere Rohstoffe in sieben Stufen. Und alle Parameter hängen kritisch voneinander ab.« Tatsächlich erinnert der Prozess an die alte Technik des »Metallgusses mit verlorener Form«. Er beginnt mit Polyurethanschaum, der in verschiedenen Porositäten erhältlich ist und bereits die gewünschte Endstruktur vorgibt: ein Netz aus dünnen Stegen, die Poren bilden. Allerdings wäre eine solche Struktur, 1 : 1 auf das Metall übertragen, zu wenig stabil, da die Stege zu dünn sind. Daher beschichten die M-Pore-Techniker das Polymer mit einem Wachs, um diese zu verdicken. Anschließend wird eine Suspension aus Keramikpulvern eingegossen; die genaue Zusammensetzung gehört zu den Betriebsgeheimnissen von M-Pore.

Mehrere Stunden bei 120 Grad und später 350 Grad Celsius entwässern die Keramik, schmelzen das Wachs aus und zersetzen den Kunststoff. So erhalten die Ingenieure eine Negativform der gewünschten Poren und Kanäle, gebildet aus der Keramik. In die noch heiße Form gießen die Techniker die flüssige Legierung ein. Bis zu einem Millimeter können die entstehenden Porendurchmesser betragen, bei noch kleineren Strukturen würde das Metall nicht mehr vollständig in die Hohlräume fließen. Nach dem Abkühlen platzt die Keramik und wird herausgeklopft oder mit Wasser ausgespült. Übrig bleibt ein poröses Metallteil, das dann noch in Form zu fräsen oder zu schneiden ist. »Der Clou an der Sache ist, die Keramik genau so fest zu machen, dass sie den Gussprozess übersteht und danach eine Konsistenz wie Puderzucker annimmt«, erläutert Girlich.

Knapp fünf Jahre haben die M-Pore-Entwickler gebraucht, um das Verfahren für verschiedene Metalle und Legierun-

Metallschwämme eignen sich für diverse Anwendungen. Die offenporige Struktur (links) dient als Wärmetauscher: Dank ihrer großen Oberfläche kann sie die Wärme eines heißen Mediums schnell an ein Speichermaterial übertragen und umgekehrt wieder abgeben. Ein weiterer Vorteil von Metallschwämmen: Der Formenvielfalt sind zudem keine Grenzen gesetzt (rechts).

FOTOS: M-PORE



gen maßzuschneidern. Rund ein Drittel der Kosten für ein Bauteil entfallen derzeit auf die Keramik, ursprünglich waren es sogar neunzig Prozent. Deshalb versuchten die Ingenieure, den Materialeinsatz zu reduzieren. Dessen Halbierung ist bereits gelungen. Mehr ist wohl nicht drin, weil sonst beim Gießen die Stabilität nicht gewährleistet ist. Sie untersuchen zurzeit, welche Bestandteile des Werkstoffs beim Brennen verloren gehen, um den »Produktionsabfall« aufzubereiten und wieder zu verwenden. »Ein Billigartikel wird das Material aber nie werden«, stellt Girlich klar.

Für Spezialanwendungen ist der Preis heute schon konkurrenzfähig. »Wegen seiner guten effektiven Wärmeleitfähigkeit eignet sich diese Art von Metallschaum sehr gut, um Prozessoren zu kühlen«, bekräftigt Girlich. Mit jeder neuen Computergeneration wächst mit der Taktzahl auch die Wärmeproduktion der Chips. »Hauptplatinen biegen sich bereits unter der Last.« Das neue Material ist mindestens ein Drittel leichter als herkömmliche Kühlkörper.

Besonders interessant sei die Gewichtseinsparung in der Luft- und Raumfahrt. Im All könnte das poröse Metall vor Weltraumschrott oder Staubteilchen schützen, wie Versuche am Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik in Freiburg ergeben haben. Die Außenhülle von Satelliten könnte dann dünner und leichter werden.

Neuartige Katalysatoren dank innerer Beschichtung

Seit etwa einem Jahr steht das neue Material in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung. Es gibt allerdings noch keinerlei Prüfnormen für Druckstabilität oder Leitfähigkeit. Die Normen sind auf Grund der fraktalen Struktur auch schwer zu erstellen. So hängen die Ergebnisse von Zugversuchen davon ab, wie das Material eingespannt wird. »Wir arbeiten jetzt mit einem Fraunhofer-Institut an einer DIN-Norm«, sagt Girlich.

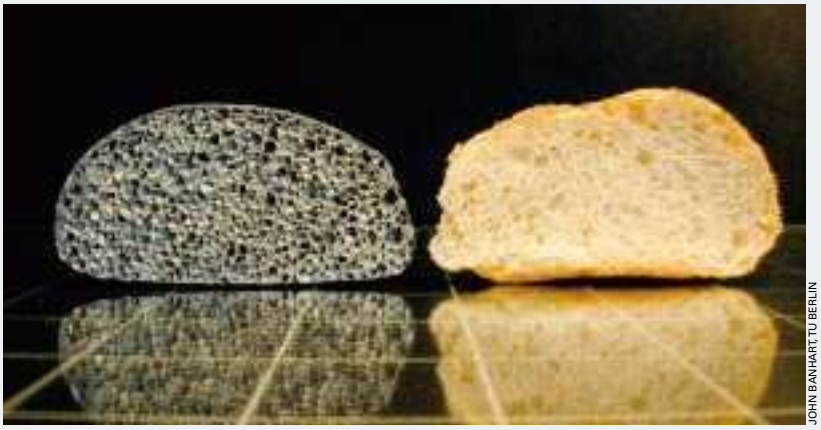
Inzwischen ist auch ein Vertrag mit einem Großkunden in Reichweite: GEA, eine Tochter der Metallgesellschaft, will mit M-Pore einen Wärmetauscher für industrielle Anwendungen auf den Markt bringen. Dieser Ölkühler für Maschinen wäre mit dem porösen Metall deutlich kleiner und leichter. Die Pumpen und der Rest der Peripherie könnten damit auch kleiner ausfallen.

Girlich forscht auch an einem geeigneten Material als Katalysatorträger zur Schadstoffreduzierung in Dieselmotoren. Da alle inneren Poren miteinander verbunden sind, kann der Werkstoff durch Eintauchen entsprechend beschichtet werden. Das Metall muss für diese Anwendung mechanisch und thermisch besonders beständig sein sowie dem eigentlichen Katalysator einen guten Haftgrund bieten. Ein favorisiertes Projekt ist zudem der Einsatz des Materials als Knochenimplantat. »Es sollte möglich sein, das Metall mit dem Knochenmaterial Hydroxylapatit zu beschichten«, sagt Girlich. Technisch sieht der Forscher keine Probleme: »Inzwischen können wir beliebige Teile in Serie fertigen.« ◁

Norbert Aschenbrenner

Der Autor ist promovierter Chemiker und Wissenschaftsjournalist in München.

STICHWORT: METALLSCHÄUME



JOHN BANHART, TU BERLIN

Wie beim Brotbacken gehören oft auch bei Metallschäumen Pulver, Treibmittel und Wärme zur Rezeptur. Um die Poren zu verbinden, ist das Unternehmen M-Pore aber einen anderen Weg gegangen.

Ein Objekt aus Metallschaum oder -schwamm wiegt nur zwanzig bis fünfzig Prozent eines baugleichen Objekts aus massivem Material. Denn sein Volumen besteht mindestens zur Hälfte aus Hohlräumen. Bei Schäumen sind diese Poren geschlossen, beim Schwamm miteinander verbunden. Schon seit den 1940er Jahren untersucht, gelingt es erst seit etwa 15 Jahren, solche Werkstoffe mit **hoher Qualität bei akzeptablen Kosten** herzustellen. Insbesondere ein Verfahren des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Materialforschung in Bremen hatte der Technologie zum Durchbruch verholfen: Wie beim Brotbacken wird pulverförmiges Ausgangsmaterial mit einem Treibmittel vermischt, zu einem Vorprodukt gepresst und anschließend unter Wärme aufgeschäumt.

Weniger Material bedeutet aber eine geringere Festigkeit. Dementsprechend verformt sich ein geschäumtes Bauteil stärker als ein massives, auf Grund seiner inneren Struktur aber auch gleichmäßiger. Diese Werkstoffe können also mechanische **Energie aufnehmen und vernichten**, eignen sich mithin für Stoßfänger beim Automobil. Überdies dämpfen diese Werkstoffe Schwingungen sehr gut. Auf der anderen Seite verleiht Metallschaum Steifigkeit. Denn die wächst mit der Dicke einer Platte. Bringt man also eine Schicht Metallschaum zwischen zwei Bleche, hält eine solches »Sandwich« viel mehr Belastung aus als ein massives Blech, das ebenso viel wiegt, aber dünner ist.

Des Weiteren erwarten Ingenieure, die **Wärmetauscher und Kühlkörper** entwickeln, viel von der Porenstruktur. Zwar ist die Wärmeleitfähigkeit geschäumter Metalle eigentlich schlechter, denn es steht weniger Metall für den Wärmetransport zur Verfügung. Bei einem Zehntel der Dichte reduziert sich die Leitfähigkeit auf etwas mehr als drei Prozent des massiven Metalls. Sind die Poren aber durch Kanäle verbunden, sodass ein Kühlmedium hindurchströmen kann, wächst die effektive Leitfähigkeit wegen der großen inneren Oberfläche erheblich.

ANÄSTHESIE

Risikomanagement im OP

Narkosen sind heute eher ungefährlich, doch ein Restrisiko bleibt. Um es zu minimieren, lernen Ärzte von der Luftfahrt.

Von Christoph Grube und Bernhard Graf

Vom Frühgeborenen bis zum Greis gibt es heute für fast jeden Patienten ein angemessenes und sicheres Narkoseverfahren. Das war nicht immer so. Erst mit der Einführung der Vollnarkose und der örtlichen Betäubung Mitte des 19. Jahrhunderts wurde es möglich, Patienten schmerzfrei zu operieren. Alsbald zeigten sich jedoch auch Gefahren, die mit den neuen Methoden einhergingen: Patienten erstickten während der Narkose oder starben an plötzlichem Herzversagen. Nach dem Erwachen folgten oft schwere Übelkeit und anhaltendes Erbrechen. Langfristig konnten die Leber oder das Herz-Kreislauf-System Schaden nehmen.

Bessere Medikamente und Techniken haben diese Probleme weitgehend gelöst. Beispielsweise halten so genannte Trachealtuben hier zu Lande seit Ende des Zweiten Weltkrieges die Atemwege frei und verhindern das Ersticken. Heute lassen sich Vitalfunktionen wie Herzschlag, Blutdruck oder Sauerstoffsättigung des Blutes während der Betäubung kontinuierlich überwachen, kritische Entwicklungen rechtzeitig erkennen. Zudem obliegt die Durchführung der Narkose seit den 1950er Jahren einem Facharzt für Anästhesie – zuvor waren der Operateur oder sein Hilfspersonal dafür zuständig.

Doch trotz aller bemerkenswerten Fortschritte: Ein Restrisiko bleibt, als Folge einer Narkose Gesundheitsschäden zu erleiden oder gar dabei zu sterben. Um es weiter zu verringern, analysieren Forscher weltweit die Gefahren der Anästhesie. Dieser »Offenlegung« sollte ein systematisches Risikomanagement folgen, wie es in anderen sicherheitskritischen Arbeitsfeldern wie der Luftfahrt oder der Kerntechnik längst üblich ist.

Seit Mitte der 1980er Jahre werden in den USA, Australien und Europa Zwischenfälle während der Betäubung in groß angelegten wissenschaftlichen Studien erfasst. Eine wichtige Informationsquelle waren beispielsweise die Akten abgeschlossener Schadensfälle von Haftpflichtversicherern. Andere Studien werteten alle Zwischenfälle aus, die von Ärzten in ein freiwilliges und anonymisiertes Meldesystem eingegeben worden waren. Besondere Beachtung fand eine britische Untersuchung der näheren Umstände aller Todesfälle, die bei mehr als 500 000 Operationen während der Narkose aufgetreten waren.

Trotz unterschiedlicher Krankenversorgungssysteme in den untersuchten Ländern kommen diese Analysen zu relativ einheitlichen Ergebnissen: Bei einer von rund 200 000 Operationen ereignet sich ein tödlicher Zwischenfall, der einzig einem Anästhesiefehler zugeschrieben werden muss. (Zum Vergleich: Die Gesamtsterblichkeit lag bei eins pro 150 Operationen. Diese hohe Zahl ergibt sich aber vor allem dadurch, dass auch eher aussichtslose Fälle in der Statistik berücksichtigt werden.) Um das Zwanzigfache höher liegt die Rate an Narkosekomplikationen, die bleibende und teils schwere Folgen wie Lähmungen, Herzversagen oder Hirnschäden nach sich ziehen.

Als Hauptursache aller schweren Zwischenfälle gilt menschliches Versagen, auch darin stimmen die Analysen überein: Zwischen sechzig und achtzig Prozent aller Vorfälle beruhen demnach auf typischen Fehlern wie dem Verwechseln von Medikamenten, dem fehlerhaften Bedienen von Narkosegeräten oder dem Einsatz defekter Apparate.

Menschliches Versagen vermeiden

Wie aber können solche Irrtümer geschehen? Zwei Gründe scheinen besonders wichtig: falsches Einschätzen einer kritischen Situation und mangelnde Organisation von Personal und Abläufen, um eine solche Situation zu beherrschen. Zwar verfügen die meisten Anästhesisten sehr wohl über das theoretische Wissen, wie eine Krise zu lösen ist. Doch offenbar scheitern sie mitunter, diese Kenntnisse in die Tat umzusetzen. Abhilfe verspricht hier eine systematische Ausbildung im Krisenmanagement. Vorbilder können Konzepte zur Minimierung menschlicher Fehler sein, wie sie in der Luftfahrt längst gängige Praxis sind.

Auch dort verursacht menschliches Versagen sechzig bis achtzig Prozent aller Zwischenfälle. Wieder sind die typischen Fehler: mangelhafte Kommunikation (zwischen Besatzung und Fluglotsen oder zwischen den Crewmitgliedern selbst) sowie schlechte Nutzung verfügbarer Informationen und Ressourcen in kritischen Situationen. Deshalb entwickelten Ingenieure und Psychologen im Auftrag der Fluggesellschaften ein Konzept, das die Einzelgrößen »Mensch, Technik und Organisation« – kurz MTO – als Determinanten von Risiken begreift. Wenn etwa

UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Am Patientendummy üben Narkoseärzte die Maßnahmen beim Herzstillstand: das Beatmen über eine Maske und das Ansetzen des Defibrillators auf der Brust. Die Übung findet unter direkter Anleitung statt (rechts Christoph Grube).

UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Ein so genannter Endotrachealtubus hält die Luftröhre des Patienten frei und verhindert so ein Ersticken; er dient gleichzeitig der Beatmung und der Zuführung von Narkosegas.

sicherheitsrelevante Bauteile zuverlässiger arbeiten oder kritische Regelabläufe in Gefahrensituationen automatisch ablaufen, verbessert das die Gesamtsicherheit der Technik. Ausreichendes und qualifiziertes Personal sowie Standardprozeduren und Katastrophenpläne optimieren den Bereich Organisation.

In der Luftfahrt werden Piloten kontinuierlich und systematisch entsprechend geschult. Zur Standardausbildung gehört beispielsweise immer wieder das »Crew Ressource Management« – eine Schulung der gesamten Crew im Simulator (siehe Spektrum der Wissenschaft, 7/1997, S. 66). Dabei werden Situationen simuliert, die nur durch eine funktionierende Kommunikation und Interaktion im Team sowie den effizienten Einsatz aller technischen Ressourcen zu beherrschen sind. Menschlichem Versagen kann wirksam vorgebeugt werden, wenn man diese Schlüsselfähigkeiten gezielt übt.

Nach einem allgemein akzeptierten Modell steigt die Wahrscheinlichkeit einer Katastrophe, wenn sich innerhalb eines Gesamtsystems mehrere fehlerhafte Gegebenheiten zu einer Fehlerkette verbinden. Fällt etwa bei einem mehrstrahligen Flugzeug ein einzelnes Triebwerk aus, ließe sich das rein technisch gut kompensieren. Reagiert die Crew aber zu spät oder falsch, kann die Fluglage instabil werden. Kommen noch weitere Probleme hinzu – etwa ein Unwetter oder fehlerhafte Informationen des Fluglotsen – droht der Absturz. Trotz der ursprünglich technischen Ursache wäre es dann eine Folge menschlichen Versagens.

Die Situation im Operationssaal ist mit diesem Szenario durchaus vergleichbar. Ein unerwarteter Blutverlust lässt sich relativ leicht ausgleichen. Wird er aber zu spät erkannt oder falsch eingeschätzt, kann sich der Zustand des Patienten destabilisieren. Kommen noch weitere Fehler hinzu – etwa mangelnde Kommunikation oder ein Mangel an Blutkonserven im OP auf Grund schlechter Planung –, drohen bleibende Schäden oder sogar Tod.

Simulatortraining für den Narkosearzt

Um solche tragischen Fehlerketten zu vermeiden, entwickeln wir in Heidelberg ein »Sicherheitssystem Anästhesie«, das sich ebenfalls an den Einzelgrößen Mensch, Technik und Organisation orientiert. Im Bereich Technik bedeutet das natürlich, alle Geräte funktionstüchtig und auf dem jeweils neuesten Sicherheitsstandard zu halten. Dem aktuellen Stand der Technik sollte auch die Informationsverarbeitung entsprechen – etwa das Management von Patientendaten oder die Telekommunikation. Im Bereich Organisation können Abläufe besser strukturiert oder das Personal durch gezielte Qualifikationsmaßnahmen optimal auf die speziellen Erfordernisse vorbereitet werden.

Die Hauptquelle möglicher Zwischenfälle bei der Narkose ist aber der Anästhesist selbst. Ihm mangelt es nicht an Wissen und Können, sondern daran, seine Fähigkeiten in der realen Krisensituation effektiv umzusetzen. Diese »non technical skills« versuchen wir mit speziellem Training zu fördern: Wie Piloten im Simulator üben unsere Anästhesisten in realistischer Operationsatmosphäre ein adäquates Verhalten an lebensechten Patientendummies. In einer simulierten OP-Szene konfrontieren wir den Narkosearzt beispielsweise mit einer lebensbedrohlichen allergischen Reaktion seines Patienten. Ohne Zaudern muss er die richtigen Medikamente auswählen, mit dem Chirurgen und der Anästhesieschwester handlungsorientiert kommunizieren und Prioritäten für den weiteren Verlauf der Operation setzen.

Während des Trainings erlebt der Arzt seine Stärken, Schwächen und Grenzen. Speziell geschulte Instruktoren achten bei der Analyse des Trainings insbesondere auf Kommunikation, Führungsverhalten, Delegation und Ressourcenmanagement und erarbeiten gemeinsam mit dem Narkosearzt notwendige Verbesserungen. Während der Simulation erlebt der Trainee zudem verschiedene Szenarien aus unterschiedlichen Positionen. Er kann aktiv und zeitnah rückkoppeln und mit Hilfe dieses »Acute Crisis Ressource Managments« seine Kompetenz nach und nach steigern. Der Aufwand ist erheblich, doch der Erfolg kommt allen Beteiligten zugute – in erster Linie den Patienten. ◁

Der Narkosearzt **Christoph Grube** ist Koordinator des Heidelberger Anästhesie- und Notfall-Simulators HANS und Risikomanager der Klinik für Anästhesiologie der Universität Heidelberg. **Bernhard Graf** ist ebenfalls Narkosearzt und Leitender Oberarzt dieser Klinik.

RECHNERNETZE

Linux-Cluster macht Schule

Das Prinzip des Steinsuppen-Computers – jeder gibt ein bisschen dazu, bis aus Nichts etwas Schmackhaftes wird – funktioniert auch für den Computerraum der Schule.

Von Hinnerk Gnutzmann

Der Computerraum der Schillerschule in Hannover bietet zu Beginn des Schuljahres 2001/2002 ein durchaus typisches Bild: eine bunte Vielfalt an PCs, die meisten schon etwas älter, mit unterschiedlichster Software versehen und häufig defekt. Helfer haben die Geräte in mühevoller Kleinarbeit zu einem Netzwerk verbunden, doch selbst ein kleiner Defekt eines einzelnen Rechners erfordert langwierige Reparaturversuche. Die Schüler sind nicht recht glücklich, denn moderne Software, die sie von zu Hause gewohnt sind, läuft auf den mit Rechenleistung und Speicherplatz bescheiden ausgestatteten Geräten nicht. Die Lehrer sind ebenfalls nicht glücklich, denn sie können sich nie darauf verlassen, dass für den Unterricht genügend Computerarbeitsplätze zur Verfügung stehen.

Das Ziel ist leicht formuliert, aber sehr anspruchsvoll: Gesucht sind Computer, die stabil laufen und wenig Wartung benötigen. Obendrein sollten alle Geräte die gleiche Benutzeroberfläche haben; das alles mit den finanziellen Möglichkeiten einer Schule. Die Überraschung ist: Durch eine Eigenentwicklung abseits des Standards konnten wir binnen eines Jahres genau dieses Ziel realisieren.

Wir wollten aktuelle Programme auf allen Geräten gleichermaßen zur Verfügung stellen – auch auf denen, die dafür eigentlich zu schwach sind. Das funktioniert mit einer Technik, die in Firmen häufig praktiziert wird: Die Computer an den Arbeitsplätzen dienen vornehmlich als Terminals, das heißt als Ein- und Ausgabegeräte, während ein leistungsstarker zentraler Server die eigentliche Rechenarbeit erledigt. Einen alten PC in ein Terminal umzuwandeln ist nicht schwer. Hardware vom Typ 486 und darunter reicht bereits aus, und die ist reichlich und günstig verfügbar. Aber die Kosten eines Servers, der ausreichend viele Terminals bedienen kann, würden diesen Vorteil wieder zunichte machen.

Groß und schnell wie Vogel Strauß

Um dieses Problem zu lösen, wollten wir einen Cluster aufbauen: Mehrere, aus Standard-Komponenten aufgebaute Geräte sollten so zusammen arbeiten, als wären sie eine große Einheit. Damit bieten sich alle Vorteile einer zentralisierten Architektur ohne den größten Nachteil, nämlich den der hohen Server-Kosten.

Rechen-Cluster wie der unter dem Namen Beowulf populär gewordene Steinsuppen-Computer (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 88) sind darauf ausgelegt, hohe Rechenleistungen zu erbringen, indem sie eine komplexe Aufgabe in verschiedene Teile zerlegen und diese parallel auf verschiedenen Rechnern des Clusters, den so genannten Knoten, ausführen. Diese Technik ist in der Forschung weit verbreitet, für unsere Zwecke aber ungeeignet: Die Standardaufgaben, die ein Schulcomputer zu bewältigen hat – Textbearbeitung und Recherche im Internet –, sind eben nicht komplex, aber zahlreich. Es bringt nichts ein oder ist sogar schädlich, diese kleinen Probleme in noch kleinere Teile zu zerlegen.

Daher habe ich eine eigene Software speziell für den Betrieb eines Terminalservers entwickelt. Sie heißt Ostrich (Strauß), in Anlehnung an den Vogel, der wie der Cluster sehr groß ist, trotzdem aber schnell läuft. Dem Benutzer erscheint das fertige System so, als sitze er an einem Computer mit einem lokalen Betriebssystem, und zwar immer vor demselben, gleich welches Terminal er nutzt. Insbesondere steht ihm überall dasselbe, Linux-typisch baumartig strukturierte Dateisystem zur Verfügung; darin sind alle Benutzerprogramme und -daten gespeichert. Jeder Knoten des Clusters greift dabei auf das gleiche Dateisystem zu (»shared root«), sodass neue Programme nur einmal aufgespielt werden müssen und dann von allen Terminals aus verwendbar sind. In vielerlei Hinsicht kann man den Cluster wie ein Einzelplatzsystem konfigurieren; der Wartungsaufwand für die Anwendersoftware bleibt also unabhängig von der Netzwerkgröße fast konstant. Auch in der Bedienung unterscheidet sich das System nicht unbedingt von einer Standardinstallation: Alle Programme lassen sich genau so benutzen, als würden sie auf dem Terminal selbst ausgeführt. Benutzer müssen keineswegs wissen, dass sie auf einer Cluster-Architektur arbeiten, um diese nutzen zu können.

Aber das Dateisystem der Benutzer ist nur virtuell und im Prinzip über mehrere Knoten verteilt. Konventionelle Cluster-Installationen haben oft ein Speichersystem, das Programme und Daten jedesmal bei Bedarf von dem Knoten abruft, auf dem sie lagern. Das ist zwar für den Administrator recht einfach zu warten, erzeugt aber sehr viel Datenverkehr; mit unserer Zehn-Megabit-Verkabelung kann man ein solches System nicht realisieren.

Glücklicherweise kann man Dateien in zwei Kategorien einteilen: in kleine wie E-Mails oder Briefe, die häufig geän-

dert werden, und in dauerhaftere, aber sehr umfangreiche, wie etwa Systemdateien. Das Ostrich-System macht sich diese Unterschiede zunutze. So liegt von den Systemdateien auf jedem Knoten eine Kopie, sodass deren Abruf das Netz nicht belastet. Benutzerdateien hingegen werden auf einem zentralen Speicherserver abgelegt, von dem jeder Knoten sie bei Bedarf lädt. So ist sichergestellt, dass alle Terminals die gleiche Version eines Dokuments abrufen. Außer der Verminderung des Datenverkehrs bringt dieses Verfahren noch einen Gewinn an Sicherheit: Eine unbedachte Wartungsoperation bringt nicht gleich den Cluster zum Erliegen, denn über ein Web-Interface muss jede Änderung in den Systemdateien bestätigt werden, bevor sie aktiv wird.

Wenn der Benutzer ein Programm aufruft, wird dieses automatisch auf dem am wenigsten ausgelasteten Knoten gestartet. Es gibt in diesem Cluster keinen »Chef-Computer«, der den anderen die Arbeit zuweist und dessen Ausfall den ganzen Cluster lahm legen würde. Das System besteht aus gleichberechtigten Knoten und ist voll funktionsfähig, solange noch mindestens einer von ihnen arbeitet. Damit bietet der Cluster zugleich hohe Leistung und hohe Verfügbarkeit. Eine weitere Besonderheit des Ostrich ergibt sich aus diesem Design: Der Cluster arbeitet nicht schlechter, wenn er größer wird.

Seit mehr als einem Jahr wird Ostrich an der Schillerschule Hannover eingesetzt. Bislang hat es keine Totalausfälle gegeben. Und wenn die Hardware eines der alten Terminals versagt, kann der Benutzer zum nächsten Gerät gehen. ◁

Hinnerk Gnutzmann besuchte die Schillerschule in Hannover und ist nun an der King's School in Canterbury (England).

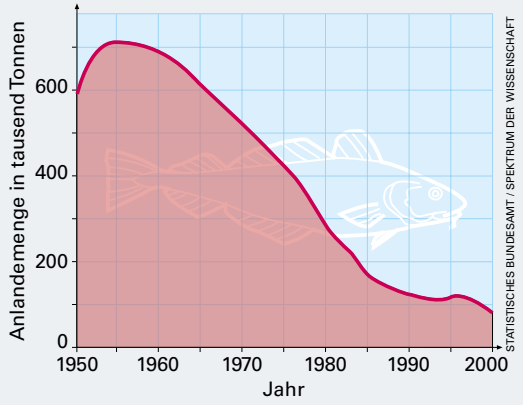
NACHGEHAKT

Das Geschäft mit dem Fisch

Der Markt entscheidet über Leben und Tod im Weltozean.

Das Bild der Meere hat sich gewandelt. Die 1,3 Milliarden Kubikkilometer Wasser bergen zwar viel Unbekanntes, zu Respekt und Zurückhaltung in der Bewirtschaftung trug dies aber nicht bei. Im Gegenteil: Wir haben in das fremde Ökosystem eingegriffen und es ausgebeutet. Die Vernichtung zahlreicher Tierarten ist kaum mit Unwissen zu entschuldigen oder gar mit dem Räuber-Beute-Mechanismus, mit dem wir Menschen uns zum Herrscher über alles Lebens erklären.

Weltweit sind die Fischbestände rückläufig. Selbst die 1996 von der UN-Organisation für Ernährung und Landwirtschaft FAO (Food and Agricultural Organisation) ausgesprochene Warnung, dass in neun der 17 weltgrößten Fanggründe die Bestände »ernsthaft zurückgehen«, vier »wirtschaftlich erschöpft« seien und die restlichen bereits »voll ausgebeutet«, erbrachte keine Wendung. Paradoxerweise subventionierten wir weitere Fangflotten, verbesserten die Fischereitechnik, umgingen Gesetze, um auch den letzten der Letzten nachstellen zu können. Nur ein Umdenken auf allen Ebenen – vom Verbraucher über Politiker bis zu den Wirtschaftsbossen – könnte die Gefahr abwenden. Das jüngste Beispiel, die kommerzielle Ausrottung des Kabeljaus in der Nordsee (SdW, 4/2003, S. 95), zeigte jedoch, wie gering die Einsicht in unser Fehlverhalten ist.



Die in Deutschland angelandete Menge Fisch ist in den letzten Jahrzehnten drastisch zurückgegangen.

Trägt die Wissenschaft eine Mitschuld? Das Reproduktionsverhalten wirtschaftlich nutzbarer Arten ist unzureichend bekannt. Bestandsabschätzungen, die den Fischereiquoten zugrunde liegen, sind zu ungenau. Ein spezielles Wahrscheinlichkeitsmodell, das so genannte Bayes-Theorem, soll nun helfen, auf Stichproben beruhende Vorhersagen mit Erfahrungen aus früheren Fängen zu koppeln (New Scientist, 22. 3. 2003, S. 44). Doch selbst mit genauerem Datenmaterial bleiben die daraus abgeleiteten Fangquoten und Schonzeiten nur Empfehlungen. Den tatsächlichen Maßnahmenkatalog beschließt die Europäische Kommission, die ihre eigenen nationalen Experten zu Rate zieht. Dass dabei wirtschaftliche Interessen berücksichtigt werden, versteht sich von selbst. Letztlich ist es der Markt, der entscheidet.

Ohnehin sind es vor allem die Subventionen, die den Wirtschaftszweig Fischerei in den Ruin treiben. Die FAO schätzt, dass pro Jahr rund 71 Milliarden Dollar ausgegeben und Fische im Wert von nur 54 Milliarden Dollar aus dem Meer gezogen werden – ein unrentables Geschäft. Ebenso unwirtschaftlich verhält es sich mit dem Beifang: Durchschnittlich 27 Millionen Tonnen nicht marktfähiger Fische werden pro Jahr gefangen. Tot oder langfristig nicht lebensfähig werden sie wieder über Bord geworfen und gehen in keine Statistik ein. Sollte es wirklich zu spät sein, diesen Irrsinn aufzuhalten?

Längst etabliert sich ein neuer Zweig: die Aquakultur. Mit einer jährlichen Produktivitätssteigerung von 12,5 Prozent gehört die kontrollierte Fisch- und Muschelzucht zu den weltweit größten Wachstumsmärkten. Vielleicht werden einige arbeitslose Fischer den Sprung ins neue Wasser wagen. Für Verbraucher und Wirtschaft wäre in jedem Fall gesorgt. Und eventuell erhielte die »nachwachsende Ressource Meeresfisch« wieder eine Chance. Doch was hätten wir gelernt?

Nardine Löser

Die Autorin ist Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

Bildungsfutter und Lesespaß in einem!

Spektrum-Sachbücher

Jürgen Blunck (Hrsg.)

Wie die Teufel den Mond schwärzten

Die dunklen Flecken auf dem Mond, seine Veränderungen im Laufe eines Monats oder gar die seltenen Verfinsterungen bei Vollmond haben Menschen seit Urzeiten Rätsel aufgegeben. In den Mythen und Sagen vom Mond spiegeln sich vielfältige Versuche, die Mondbeobachtungen in einen sinnvollen Zusammenhang zu bringen - in Geschichten wie die von den *Teufeln, die den Mond schwärzten* ...

Ein Muss für alle Astro-Fans!

2003, 292 S., 26 Abb., geb.
€ 19,95, ISBN 3-8274-1409-1

Volker Kasten (Hrsg.)

Von den Sternen zu den Galaxien

Was sind Sterne? Was bringt sie zum Leuchten und wie entstehen sie? Wie kommt es dazu, dass Sterne unterschiedliche Farbspektren aufweisen, sich zu Mehrfachsternen verbinden oder gar ganze Haufen und Galaxien wie die Milchstraße bilden? Dieses Buch gibt leicht verständliche Antworten aus der Feder von kompetenten Autoren, die für die renommierte Zeitschrift *Sterne und Weltraum* schreiben.

2003, 232 S., 200 Abb., geb.
€ 29,95, ISBN 3-8274-1378-8

Lernen – wie funktioniert das?

Manfred Spitzer

Lernen

Wir lernen nicht nur in der Schule, sondern vor allem im Leben. Es geht nicht um Büffeln und Tests, sondern um Fähigkeiten und Fertigkeiten, die wir zum Leben brauchen. Lernen ist die natürliche und nicht zu bremsende Lieblingsbeschäftigung unseres Gehirns. Wie unsere „Lernmaschine im Kopf" arbeitet und wie wir sie mit Lernerfolg – und auch Vergnügen – arbeiten lassen können, das vermittelt dieses spannende Buch.

2002, 500 S., 93 Abb., geb.
€ 29,95 ISBN 3-8274-1396-6

Der Farbtupfer im Bücherregal!

Norbert Welsch / Claus Chr. Liebmann

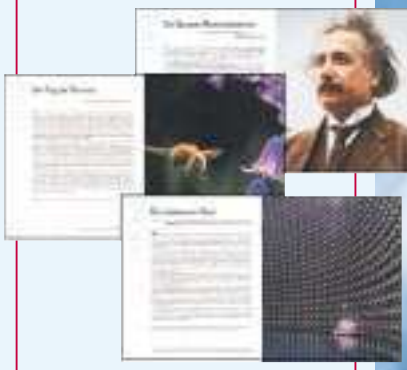
Farben

Ein faszinierend vielfältiges Panorama zum Thema Farben! Die Autoren erklären die naturwissenschaftlichen Phänomene klar und anschaulich, erläutern die Farbpsychologie und ihre Symbolik und erklären die Bedeutung von Farben in den Kulturen verschiedener Epochen und Länder.

Ein interdisziplinäres Buch zur Wunderwelt der Farben, das zum Schmökern und Nachschlagen verleitet und das man immer wieder gerne zur Hand nehmen wird – sei es wegen der ansprechenden Fotografien oder wegen der klaren Texte.

2003, 434 S., 300 Abb., geb.
€ 49,95 ISBN 3-8274-1383-4

Ein Meisterwerk!
Süddeutsche Zeitung



Peter Tallack (Hrsg.)

Meilensteine der Wissenschaft

Von den Ursprüngen des Zählens … bis zur Sequenz des menschlichen Genoms – in 250 Porträts entscheidender Ideen, Entdeckungen oder Erfindungen und ihrer Protagonisten veranschaulicht dieses Buch die Entwicklung der Wissenschaft von 35.000 vor Christus bis zum Jahr 2000: große wissenschaftliche Revolutionen und wegweisende Durchbrüche ebenso wie tastende Schritte und unvermeidliche Irrwege.

Das attraktive Bilderbuch und informative Nachschlagewerk in einem hat eine starke Sogkraft – wer einmal darin zu blättern anfängt, wird so bald nicht wieder aufhören wollen.

2002, 528 S., 314 Abb., geb.
€ 49,95 ISBN 3-8274-1380-X

Bitte kopieren und faxen an: 06221-9126338

Ja, ich bestelle!

		€
❑ Lernen	3-8274-1396-6	29,95
❑ Meilenst. d. Wissenschaft	3-8274-1380-X	49,95
❑ Farben	3-8274-1383-4	49,95
❑ Von den Sternen zu den Galaxien	3-8274-1378-8	29,95
❑ Wie die Teufel den Mond schwärzten	3-8274-1409-1	19,95

Preise zzgl. Versandkostenpauschale von € 3,50 pro Lieferung (Inland)
Buchpreise enthalten 7% MwSt, Preise für CD-ROMs 16% MwSt.

sdw5/03

Absender:

Name / Vorname

Straße

PLZ / Ort

E-Mail-Adresse

Datum / Unterschrift

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

www.spektrum-verlag.de

Bestellen können Sie ⏩ telefonisch 07071/935369 ⏩ per Fax 06221/9126338 ⏩ per Mail shop@spektrum-verlag.de
Sämtliche Preise enthalten 7% MwSt. und verstehen sich zzgl. Versandkosten (im Inland: € 3,50 pro Lieferung).

TERRORISMUS

Defizite in der Wahrnehmung

Erst langsam erkennt die westliche Forschung, was Selbstmordattentäter zu ihren entsetzlichen Taten treibt. Insbesondere die Politik müsste daraus die richtigen Konsequenzen ziehen.

Von Uwe Reichert

Die besonderen Umstände unserer Zeit erfordern leider verstärkt die Auseinandersetzung mit einem Phänomen, das sich spätestens seit den Anschlägen vom 11. September 2001 zu einer internationalen Bedrohung entwickelt hat: dem Terrorismus. Die Forschung weist hier noch große Defizite auf. Erst seit etwa drei Jahrzehnten wird der Terrorismus systematisch erforscht. Und bis vor kurzem waren auf diesem Gebiet nur sehr wenige Wissenschaftler tätig.

Bis heute gibt es keine allgemein anerkannte Definition des Terrorismus. Die wissenschaftliche Forschung hat zwar einige Ansätze hierzu geliefert, doch scheiterte ein Konsens an einer Reihe von Schwierigkeiten. Zunächst einmal sind terroristische Aktivitäten in verschiedenen Ländern oder Kulturen unterschiedlich ausgeprägt. Zudem können sich die Motive, Ideologien, Ziele und Strategien im Laufe der Zeit wandeln. Vollends problematisch wird es bei einer politischen oder juristischen Bewertung des Terrorismus: Nicht jede Gewaltanwendung – zum Beispiel einer Oppositionsgruppe gegen die herrschende Regierung – kann als Terrorakt eingestuft werden. Kämpft eine Minderheitengruppe gewaltsam gegen eine Regierung, welche die Menschenrechte systematisch und eklatant verletzt und jede Form der Selbstbestimmung verhindert, so lassen sich legitime und illegitime Handlungen nicht immer deutlich voneinander abgrenzen. Nicht umsonst heißt es plakativ: »Die Terroristen des einen sind die Freiheitskämpfer des anderen.«

Wenngleich derartige Schwierigkeiten einen internationalen Konsens über die Terrorismusdefinition verhindert haben, so gibt es doch inzwischen einige allgemein akzeptierte Vorstellungen. Und die Wissenschaft konnte einige Missverständnisse ausräumen. So sind Terroristen generell nicht als Guerillakämpfer einzustufen, obwohl beide Gruppierungen ideologische Zielsetzungen verfolgen und die Übergänge zwischen ihnen fließend sein können. Und Terrorismus ist keine Ideologie, die an eine bestimmte politische Richtung gebunden ist, wie man noch in den 1970er Jahren glaubte. Er ist vielmehr eine Strategie, derer sich die extreme Linke ebenso bedienen kann wie die extreme Rechte oder religiös-fundamentalistische Gruppierungen.

Einige andere Vorstellungen scheinen sich aber recht hartnäckig zu halten. So ist zum Beispiel immer wieder zu hören, dass Selbstmordattentäter verwirrte Einzeltäter seien oder aus einem sozialen Umfeld stammten, das durch Armut, Verzweiflung und mangelnde Bildung geprägt ist. Die Politik müsse deshalb darauf abzielen, dem Terrorismus den Boden zu entziehen, indem sie den Be-

AP, ROSHAN MUGAL

Im von Pakistan kontrollierten Teil Kaschmirs verteidigen Demonstranten die Terroraktionen Osama bin Ladens als Freiheitskampf.

völkerungsgruppen, aus denen sich die Selbstmordattentäter rekrutieren, durch Verbesserung der wirtschaftlichen und kulturellen Lebensumstände wieder eine Perspektive verschaffen. Dass die Attentäter des 11. September 2001 mit ihrer Herkunft und ihrer natur- und ingenieurwissenschaftlichen Ausbildung so gar nicht in dieses Schema passten, vergrößerte nur den Schock und die Ratlosigkeit in der Öffentlichkeit.

Die Mär vom ungebildeten, psychisch gestörten Attentäter

Doch auch hier beginnt die Terrorismusforschung, etablierte Vorstellungen zu revidieren. So hat der Sozialwissenschaftler Scott Atran, der am Institut Jean Nicod in Paris und am Institut für Sozialforschung an der Universität von Michigan in Ann Arbor forscht, kürzlich untersucht, welche Faktoren es sind, die im »Werdegang« eines typischen Selbstmordattentäters eine Rolle spielen (»Genesis of Suicide Terrorism« in: *Science, Bd. 299, S. 1534*). Atran hält es zwar für den besten Ansatz, dafür Sorge zu tragen, dass terroristische Gruppierungen weniger Zulauf bekommen. Doch warnt er ausdrücklich davor, die soziale Basis der Selbstmordattentäter und deren Beweggründe zu missdeuten. Insbesondere dürften keine Erklärungsmodelle herangezogen werden, wie sie in der Kriminalistik üblich seien.

Bei Eigentumsdelikten zum Beispiel gebe es durchaus einen Zusammenhang mit Armut und Bildungsniveau. Diese Täter würden weitgehend rational handeln und eine Art wirtschaftliche Kosten-Nutzen-Abwägung treffen: Wenn der potenzielle Gewinn größer sei als das Risiko, gefasst und verurteilt zu werden, falle die Wahl auf die kriminelle Tat. Aber schon auf Kapitalverbrechen wie Mord und Totschlag seien solche rationalen Überlegungen, die auf den eigenen Vorteil abzielen, kaum noch anzuwenden. Und für Selbstmordattentäter träfen derlei Modelle überhaupt nicht mehr zu.

Einen Zusammenhang mit dem Bildungsniveau scheint es Atran zufolge dennoch zu geben – allerdings in Form einer positiven Korrelation: Eine im Dezember 2001 durchgeführte Umfrage unter Palästinensern über 18 Jahre in der West Bank und im Gazastreifen ergab: Die Zustimmung zu bewaffneten Anschlägen steigt mit dem Bildungsniveau. Eine frühere Untersuchung zeigte, dass ökonomische Faktoren ebenfalls eine Rolle spielen können: Die Gebildeten unterstützen den Terrorismus verstärkt, wenn sie – zum Beispiel durch Arbeitslosigkeit – von sozialem Abstieg bedroht sind. Insgesamt lässt sich sagen, dass palästinensische Selbstmordattentäter aus einem ganz normalen sozialen Umfeld kommen, nicht verhaltensauffällig und auch keine religiösen Eiferer sind.

In der Regel wird aber niemand von alleine auf die Idee kommen, als menschliche Bombe zu fungieren. Hinter den Anschlägen stecken Organisationen oder Bewegungen, die meist junge, unverheiratete Männer nach Charakter und Geschick auswählen, sie rekrutieren und über längere Zeit auf ihre Aufgabe vorbereiten. Bewegungen wie die palästinensische Hamas verstehen es dabei geschickt, religiöse mit politischen Motiven zu verbinden, und die späteren Attentäter für ihre Zwecke zu nutzen.

Für solche Bewegungen kommen durchaus wieder rationale Gründe zum Tragen: Selbstmordattentäter zählen für sie als gut verzinste Aktivposten, deren Einsatz (und Verlust) weitere Aktivposten generiert, weil die Unterstützung in der mit der Bewegung sympathisierenden Gruppe mit jedem Anschlag steigt.

Dies trifft nicht nur für die Palästinenser zu: Kurz nach dem 11. September zeigte eine Umfrage unter gebildeten Saudis zwischen 25 und 41 Jahren, dass 95 Prozent von ihnen El-Kaida unterstützten. Die Sympathien äußern sich mitunter auch in beachtlichen Geldzuwendungen: Nachdem eine 18-jährige Palästinenserin sich in einem Jerusalemer Supermarkt in die Luft gesprengt hatte, brachte eine Mammutsendung im saudischen Fernsehen mehr als hundert Millionen Dollar für die Intifada zusammen, wie Atran berichtet.

Letztlich ist die große Herausforderung also die, das Netzwerk aus Sympathie sowie aus aktiver Unterstützung und Förderung des Terrorismus zu beseitigen. Hier ist zunächst die Forschung gefragt: Sie muss untersuchen, welche psychologischen und kulturellen Beziehungen in diesem Netzwerk eine Rolle spielen, wie sich Terrororganisationen bilden, welche Organisationsstrukturen sie haben und wie die Rekrutierungspraktiken aussehen. Zudem muss Ursachenforschung betrieben werden. Dazu gehört auch die Frage, in welchem Maße die westliche Politik und das westliche Handeln (beziehungsweise Nichthandeln) eine Katalysatorrolle für den Terrorismus spielt.

Solche Untersuchungen mögen unbequem sein und natürlich Geld kosten. Aber das Geld für diese Forschungen wäre vermutlich besser investiert als jenes, das derzeit für den verstärkten physischen Schutz von potenziell gefährdeten Einrichtungen aufgewendet wird. Um eine Krankheit zu kurieren, muss man ihre Ursache behandeln und nicht ihre Symptome. ◁

AP, ADEL HANA

Nach einem zerstörerischen Vergeltungsschlag der israelischen Armee hissen Palästinenser die grüne Flagge der Hamas-Bewegung.

Uwe Reichert ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

SPIELTHEORIE

Käsekästchen für Fortgeschrittene

Hinter dem harmlosen Kinderspiel steckt eine ganze Hierarchie von Strategien – eine komplizierter als die andere.

Von Ian Stewart

Es ist immer wieder erstaunlich, welche mathematische Komplexität in den einfachsten Spielen verborgen liegt. Nehmen wir zum Beispiel »Käsekästchen«, oder wie immer es bei Ihnen hieß, als Sie sich zusammen mit dem Banknachbarn viele langweilige Schulstunden verkürzten. Generationen von Kindern haben es gespielt, aber wahrscheinlich hat keines von ihnen je die echte Meisterschaft erreicht. Das Spiel bietet nämlich auch für den Fortgeschrittenen echte Raffinessen. Der Mathematiker Elwyn Berlekamp von der Universität von Kalifornien in Berkeley hat sie in seinem Buch »The Dots-and-Boxes Game« beschrieben.

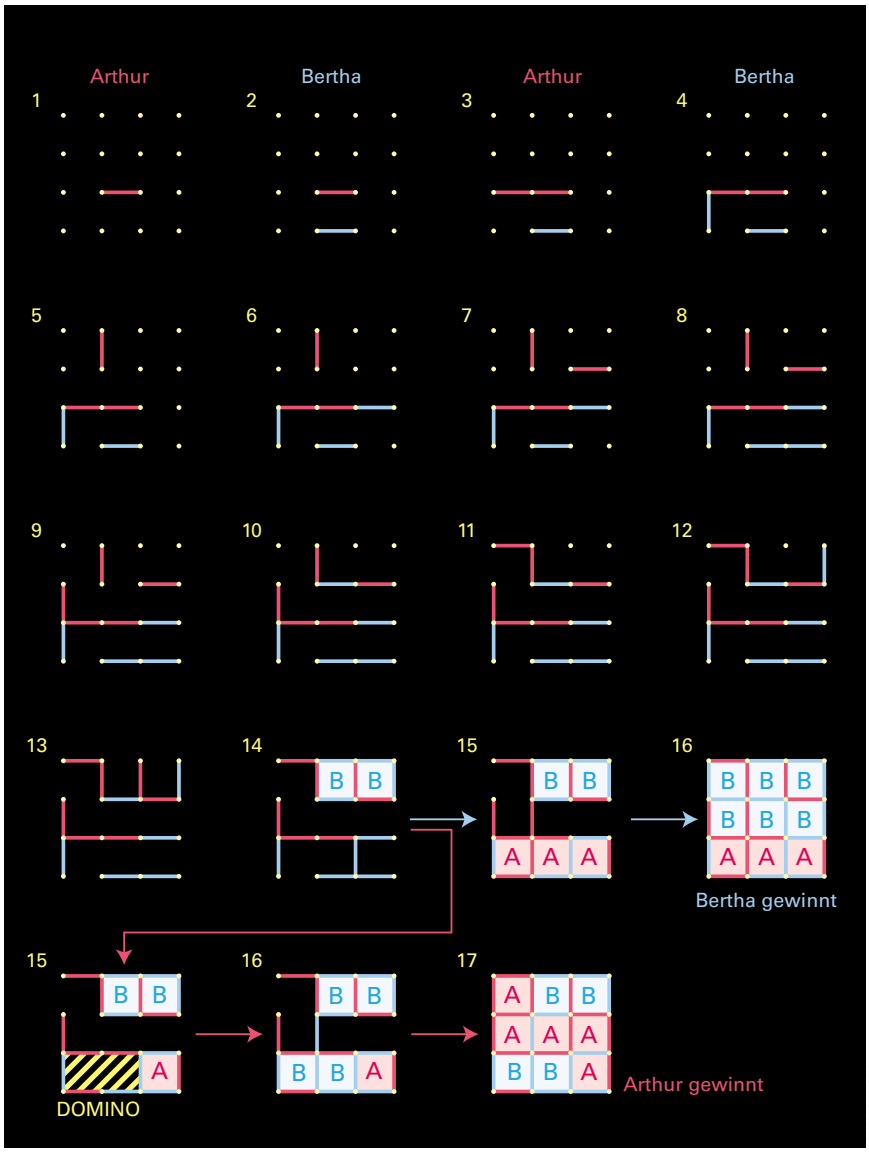
Das Spielfeld besteht am Anfang aus Punkten, die in einem quadratischen Gitter angeordnet sind. Die Schnittpunkte der Linien auf dem üblichen Rechenkästchenpapier sind dafür hervorragend geeignet; die Spieler müssen sich nur auf die Grenzen des Spielfelds einigen. Ein Feld von 6×6 Punkten (Bild ganz rechts oben) bietet schon enorme Schwierigkeiten.

Die Spieler ziehen abwechselnd. Ein Zug besteht darin, zwei waagerecht oder senkrecht (aber nicht diagonal) benachbarte Punkte durch einen Strich zu verbinden. Wer mit einem Zug ein Kästchen vollendet, das heißt die vierte Seite eines aus vier benachbarten Punkten bestehenden Quadrats zeichnet, wird Besitzer dieses Kästchens. Er schreibt den Anfangsbuchstaben seines Namens in das Kästchen und darf (und muss) ein weiteres Mal ziehen. Wenn er dabei wieder ein Kästchen vollendet, nimmt er auch dieses in Besitz, zieht eine weitere Verbindungslinie und so weiter. Wer am Ende die meisten Kästchen sein Eigen nennt, hat das Spiel gewonnen.

Wir nennen den ersten Spieler Arthur, die zweite Spielerin Bertha. Das Bild unten zeigt ein Spiel auf einem Feld der Größe 4×4, bei dem beide Spieler die einfachste Strategie anwenden. Ich nenne sie die Strategie auf Ebene 0. Sie besteht darin, dem Gegner keine Kästchen zu überlassen, solange das möglich ist, das heißt möglichst nie die dritte Seite eines Kästchens zu zeichnen; denn dann könnte der Gegner im nächsten Zug die vierte Seite ziehen und hätte ein Kästchen. Auf diese Weise wird das Spielfeld in eine Reihe von »Ketten« aufgeteilt; das sind sich über das Spielfeld schlängelnde Bereiche, die von Strichen begrenzt werden. Sobald ein Spieler das erste Kästchen einer Kette in Besitz nimmt, fällt im selben Zug die ganze Kette an ihn.

Irgendwann ist das gesamte Brett in solche Ketten aufgeteilt. Diesen Zustand nenne ich Staupunkt oder »High Noon«: Noch ist nichts passiert, aber der nächste Akt löst eine Kette von Aktionen aus, und wenig später, wenn sich der Pulverdampf verzogen hat, stehen Gewinner und Verlierer fest.

Wenn der Staupunkt erreicht ist, zieht der nächste Spieler gewöhnlich eine Linie in der kürzesten verfügbaren Kette, um seinem Gegner möglichst wenige Kästchen zu überlassen. Dieser Zug heißt »Öffnung der Kette«. Der gegnerische Spieler nimmt die Kästchen und öffnet dann mit seinem letzten Zug die nächstkürzere Kette für seinen Gegner. Bei dem



Dieses Käsekästchen-Spiel erreicht eine kritische Verzweigung im 15. Zug. Wenn Arthur die Grundstrategie verfolgt (blaue Pfeile), verliert er das Spiel. Mit einer geschickteren Strategie (rote Pfeile) kann er gewinnen.

Spiel im Bild links unten erreicht Bertha im 12. Zug den Staupunkt. Das Spielfeld ist nun in drei Ketten mit zwei, drei und vier Kästchen aufgeteilt. Im 13. Zug gibt Arthur die Kette mit zwei Kästchen weg. Bertha gibt nun im Gegenzug die Kette mit drei Kästchen an Arthur, der dafür Bertha die Kette mit vier Kästchen überlassen muss. Bertha gewinnt, denn sie hat sechs Kästchen und Arthur nur drei.

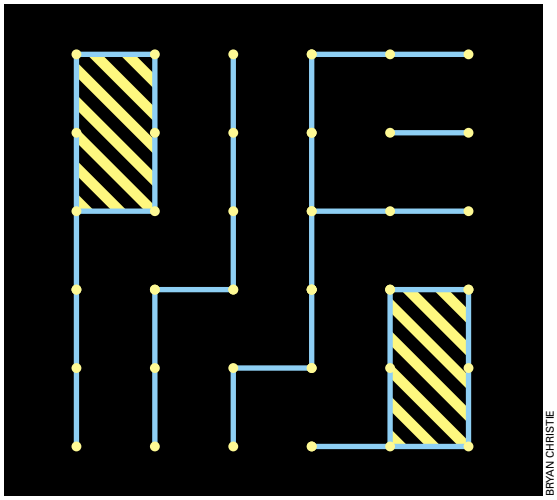
Beim Spiel auf Ebene 0 bestimmen zwei Faktoren, welcher Spieler gewinnt: ob im Staupunkt die Anzahl der Ketten im Gitter ungerade oder gerade ist, und wer in diesem Moment am Zug ist. Wenn im Staupunkt eine gerade Anzahl von Ketten vorliegt, gewinnt der Spieler, der die erste Kette öffnet, denn er gibt in jedem Zug eine Kette weg, die kürzer ist als diejenige, die er im Gegenzug erhält. Er verliert dagegen, wenn die Anzahl der Ketten beim Staupunkt ungerade ist, denn sein Gegner wird den letzten Zug im Spiel machen. Deshalb gewinnt in dem Beispiel Bertha gegen Arthur: Die Anzahl der Ketten ist ungerade, und Arthur muss die erste Kette öffnen.

Warum trifft dieses Schicksal gerade Arthur? Weil bis zum Staupunkt eine gerade Anzahl von Zügen vergangen ist. Arthur muss also danach trachten, dass die Anzahl der Züge bis zum Staupunkt

Käsekästchen ist das mathematisch reichhaltigste Kinderspiel der Welt

und die Anzahl der bis dahin entstandenen Ketten beide gerade oder beide ungerade sind. Im ersten Fall freut er sich darüber, dass er die erste Kette eröffnen darf, in zweiten, dass er es nicht muss. Bertha dagegen muss zusehen, dass eine dieser Zahlen ungerade und die andere gerade ist. Durch sorgfältige Analyse der Stellung einige Züge vor dem Staupunkt gelingt es häufig einem der Spieler, dieses Ziel zu erreichen. Ich nenne diese Strategie ein Spiel auf Ebene 1.

Aber was ist, wenn die Strategie der Ebene 1 versagt? Angenommen, Arthur gerät trotz größter Anstrengungen in die ungünstige Situation nach dem 12. Zug des Beispielspieles. Es stellt sich heraus, dass er dann immer noch gewinnen kann, und zwar indem er der Strategie auf Ebene 2 folgt. In seinem 13. Zug öffnet er die Kette mit zwei Kästchen. In ihrem nächsten Zug heimst Bertha die beiden Kästchen ein und öffnet die Kette mit drei Kästchen. Im 15. Zug aber verzichtet Arthur darauf, alle drei Kästchen dieser Kette zu nehmen. Statt dessen nimmt er nur ein Kästchen und zieht dann eine Linie am unteren Rand des Gitters, sodass ein geschlossenes 2×1-Rechteck entsteht, ein »Domino«.


BRYAN CHRISTIE

Ein 6×6-Gitter mit vier Ketten und zwei Dominos

Einen solchen Zug nenne ich einen »Kuhhandel«. Arthur verzichtet auf zwei Kästchen in der Dreierkette, aber er bringt Bertha dadurch in eine üble Lage. Wenn sie nämlich im 16. Zug eine Linie in der Mitte des Dominos zieht, gewinnt sie zwar die zwei Kästchen. Aber sie muss dann noch eine Linie ziehen und damit die Viererkette öffnen. Arthur bekommt die vier Kästchen und gewinnt mit 5 gegen 4. Wenn aber Bertha auf die zwei Kästchen des Dominos verzichtet, sieht es für sie noch schlimmer aus. Jeder andere Zug öffnet die Viererkette. Arthur nimmt sie und den Domino dazu und gewinnt mit 7 gegen 2 Kästchen.

Bertha hat in dem Moment verloren, in dem Arthur den Kuhhandel macht, denn dann ist nur noch eine Kette auf dem Brett übrig. Aber was ist, wenn noch mehrere Ketten da sind? Kann Bertha Terrain zurückgewinnen, indem sie selbst einen Kuhhandel anbietet?

Die Antwort lautet: Nicht immer. Das Bild oben zeigt ein 6×6-Gitter mit zwei Dominos und vier Ketten. Wenn Bertha am Zug ist, kann sie ohne Nachteil die beiden Dominos nehmen. (Das sollte sie auch, denn wenn sie die Dominos stehen lässt, kann Arthur sie in seinem nächsten Zug mitnehmen, ohne seine Position zu verschlechtern.) Dann öffnet Bertha die kürzeste Kette. Da die Anzahl der Ketten gerade ist, glaubt sie mit der Strategie auf Ebene 0 gewinnen zu können. Aber Arthur macht einen Kuhhandel, nimmt nur zwei Kästchen der Viererkette und hinterlässt einen Domino. Bertha muss den Domino nehmen und die Fünferkette öffnen. Wieder bietet Arthur einen Kuhhandel an, nimmt nur drei der fünf Kästchen und hinterlässt Bertha einen weiteren Domino. Solange die Ketten aus fünf oder mehr Kästchen bestehen, liegt Arthur auf diese Weise immer vorn.

In diesem Fall kontrolliert Arthur das Spiel, weil er Bertha zwingen kann, immer neue Ketten zu öffnen. Eine gute Strategie für Käsekästchen wäre also, die Kontrolle zu erlangen und sie zu behalten, indem man stets auf die letzten beiden Kästchen einer Kette verzichtet. (Außer wenn es nur noch eine Kette gibt, natürlich.) Das ist das Spiel auf Ebene 3.

Aber wie gewinnt man die Kontrolle? Mit der Strategie auf Ebene 4, die sich folgendermaßen beschreiben lässt:

- Arthur versucht zu erreichen, dass die Summe aus der Gesamtzahl der Gitterpunkte und der Anzahl der langen Ketten (jenen mit drei oder mehr Kästchen) beim Staupunkt gerade ist.
- Bertha versucht zu erreichen, dass diese Summe ungerade ist.

Das klingt schon nach einer sehr komplizierten Strategie, aber bislang haben wir erst Seite 7 von 86 Seiten Strategieerklärung in Berlekamps Buch erreicht. Käsekästchen ist ein derart trickreiches Spiel, dass eine vollständige Gewinnstrategie unbekannt ist. Berlekamp hält es für das »mathematisch reichhaltigste populäre Kinderspiel der Welt«, und zwar mit großem Abstand. ◁

Ian Stewart ist Professor für Mathematik an der Universität von Warwick in Coventry (England).

Literaturhinweise

The Dots-and-Boxes Game. Sophisticated Child's Play. Von Elwyn Berlekamp. A. K. Peters, Natick (Massachusetts) 2000.

Gewinnen. Strategien für mathematische Spiele. Band 3: Fallstudien. Von Elwyn Berlekamp, John H. Conway und Richard K. Guy. Vieweg, Braunschweig 1986.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

WISSENSCHAFT INTERDISZIPLINÄR

Norbert Welsch und Claus Chr. Liebmann

Farben

Natur, Technik, Kunst

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2003. 434 Seiten, € 49,95

Farbe ist ein wahrhaft multidisziplinäres Thema. Es erschließt sich in seiner ganzen Breite nur dann, wenn es aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet wird.

Norbert Welsch und Claus Chr. Liebmann haben genau das versucht. Die Idee zu diesem Buch entstand wohl im Zusammenhang mit der Entwicklung anderer Multimedia-Produkte in der Firma des Erstautors, die das Thema Farbe aus unterschiedlichen Wissensgebieten heraus berührten. Entstanden ist ein großzügig ausgestattetes Buch mit einer überwältigenden Fülle von Fakten, aus Kunst- und Kulturgeschichte, Psychologie, Physiologie, Biologie, Chemie und Physik.

Purpur, Lapislazuli, Lumineszenz, Regenbogen, Himmelsblau …

Das erste von vier Kapiteln umfasst historische und kulturgeschichtliche Aspekte, von der Frage, ab wann im Laufe der Entwicklung des Kosmos von Farbe gesprochen werden kann, über die Höhlenmalerei und die Farbsymbolik in Religion und Kunstgeschichte bis zu den modernen Farbsystemen der Informations- und Drucktechnologie. Rot, Grün, Blau, Gelb, Cyan, Magenta, Orange, Braun, Weiß, Schwarz und Grau werden in ihren physikalisch-chemischen Grundlagen, ihren kulturellen und technischen Bezügen und ihren psychologischen Wirkungen ausführlich beschrieben. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über die vielfältigen Versuche, Farben nach unterschiedlichsten Kriterien zu ordnen.

Kapitel 2 ist der Chemie der Farbstoffe und der Technologie des Färbens gewidmet. Die chemischen Grundlagen der Absorption sichtbaren Lichts werden ebenso behandelt wie Herkunft und bevorzugte Verwendungsbereiche zahlreicher natürlicher Farbstoffe. So erfährt man nicht nur etwas über den Blutfarbstoff Hämoglobin, das Chlorophyll oder Carotin, sondern auch über heute eher historisch interessante Farbstoffe wie Krapp, Purpur oder Lapislazuli. Ein Überblick über synthetische Farbstoffe schließt das Kapitel ab. Ergänzt wird es durch so interessante Dinge wie Geheimtinte und Haarfärbemittel.

Kapitel 3 »Farbwahrnehmung« erläutert ausführlich die Anatomie und Physiologie des menschlichen Auges und des Sehvorganges einschließlich der Signalverarbeitungsprozesse in der menschlichen Retina. Auch neuere Erkenntnisse über zentralnervöse Prozesse des Farbensehens werden angesprochen und in ihrer Bedeutung für das Erkennen von Farbe erläutert. Dazu gibt es einen kurzen Exkurs über die Evolution des Farbensehens und die Farbsehleistungen anderer Organismen sowie statistische Angaben über Farbenblindheit beim Menschen.

Die Physik farbigen Lichts und die Anwendungen von Farbe in der Informationstechnologie bilden das vierte und letzte Kapitel des Buches. Der Welle-Teilchen-Dualismus wird ebenso behandelt wie der Zusammenhang zwischen Atombau und Wellenlänge und die von den »Leuchtfarben« bekannte Lumineszenz, bei der ein Stoff mehr Energie abzustrahlen scheint, als er aufnimmt. Auch die Entstehung des Regenbogens und des Himmelsblaus fehlen nicht. Der zweite Teil dieses Kapitels bringt technische Anwendungen, von der Farbfotografie über unterschiedliche Druckverfahren hin zu Bildröhren und LCD-Monitoren der Informationstechnik, ergänzt um LEDs und Laserlichtquellen. Dabei erläutern die Autoren auch die technischen Probleme, die dadurch entstehen, dass verschiedene Ausgabegeräte wie Drucker und Monitore der Darstellbarkeit von Farben unterschiedliche Grenzen setzen.

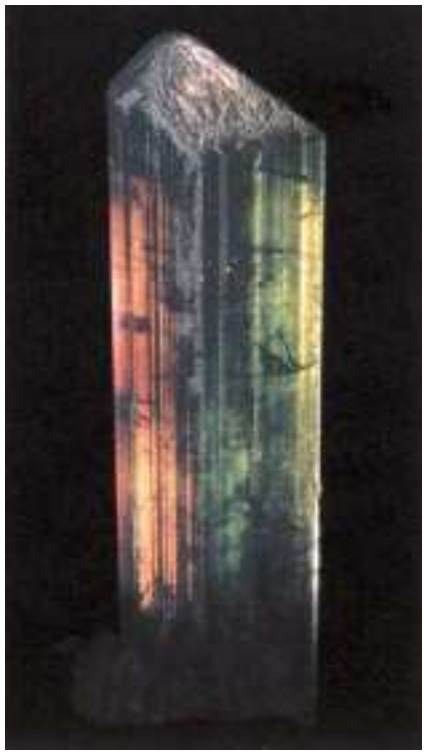
Ein Anhang enthält eine Zeittafel wichtiger Persönlichkeiten und Ereignisse im Bereich der Farbforschung, eine Tafel kulturgeschichtlicher Epochen, einige Beschreibungen chemischer Schulversuche zu Farbstoffen und zum Färben und ein 40-seitiges Glossar. Die Literaturliste ist gemessen an der inhaltlichen Breite des Buches verhältnismäßig kurz. Die Autoren begründen dies damit, dass viele ihrer Quellen aus dem Internet stammen.

Ist damit der Beweis erbracht, dass es tatsächlich möglich ist, ein Buch zu ▷

Die Regenbogenfahne der Schwulen und Lesben wird beim »Christopher Street Day« in San Francisco durch überlange Schleppen verkörpert.

schreiben, in dem alles über Farbe steht? Welsch und Liebmann haben gewagt, was kein Fachwissenschaftler der im Buch angesprochenen Gebiete riskieren würde. Die Angst, auf fremdem Terrain naive Fehler zu machen, wäre zu groß. Den Autoren ist daher Respekt zu zollen für ihren Mut und ihre Leistung. Die Fülle an sachlicher Information, die das Buch vermittelt, ist beeindruckend und hervorragend aufbereitet. Die Gesamtkonzeption halte ich für sehr gelungen, und die Darstellung gibt weitgehend den aktuellen Stand der Wissenschaft wieder, zumindest soweit er mir bekannt ist.

Leider zeigt das Buch auch, dass die Vorsicht der Wissenschaftler bei Bewegung in fremdem Gebiet nicht unbegründet ist. Etliche Detailfehler trüben das positive Gesamtbild. Einige Beispiele aus meinem Fachgebiet, dem der Farbwahrnehmung: Bei der Beschreibung der Farbe Rot (Seite 56) wird die Wellenlänge des »intensivsten Rot« mit 700 Nanometer angegeben. Aber die monochromatischen Lichter am langwelligen Endes des Spektrums erscheinen sämtlich nicht rot, sondern rot-orange. Schwarz sei »keine echte Farbe, vielmehr das Fehlen jeglichen Lichts und damit jeglicher Farbe« (Seite 94). Das ist physikalisch korrekt, aber für die Farbwahrnehmung unzutreffend. Ein Mensch in einem völlig lichtlosen Raum würde kein Schwarz sehen, sondern ein mittleres bis dunkles Grau. Das visuelle System verarbeitet insbesondere beim Hell-Dunkel-Sehen nur Kontraste. Die Darstellung von Schwarz erfordert also immer einen Kontext, der auch helle Farbflächen enthält.



Manche Kristalle zeigen »Pleochroismus«: Die Farbe ist vom Einfallswinkel des Lichts abhängig.

Zu den sachlichen Fehlern gesellt sich eine erhebliche Menge an Tippfehlern. Für eine zweite Auflage empfiehlt sich eine etwas gründlichere Endredaktion samt fachwissenschaftlicher Korrektur. Es bleibt allerdings ein positiver Gesamteindruck: Wer sich für die wissenschaftlichen Grundlagen des Phänomens Farbe interessiert, findet in diesem Buch auf nahezu jede Frage eine erste Antwort.

Hans Irtel

Der Rezensent ist Professor für Allgemeine Psychologie an der Universität Mannheim. Er betreibt ein Wahrnehmungslabor, in dem unter anderem Experimente zur Farb- und Helligkeitswahrnehmung durchgeführt werden.

POLITIKWISSENSCHAFT

Gert Krell

Arroganz der Macht, Arroganz der Ohnmacht

Der Irak, die Weltordnungspolitik der USA und die transatlantischen Beziehungen

Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung, Frankfurt am Main 2003. VII+54 Seiten, € 6,–

Noch vor wenigen Monaten waren es hauptsächlich Diplomaten, Wissenschaftler und Journalisten, die mit wachsender Sorge verfolgten, wohin sich die US-amerikanische Sicherheits- und Außenpolitik entwickelte. Planung einer nationalen Raketenabwehr, Kündigung des ABM-Vertrages, der solche Systeme verbietet, Ablehnung des Atomteststopp-Abkommens, Widerstand gegen einen Internationalen Strafgerichtshof, Absage an das Kyoto-Protokoll zur Eindämmung der globalen Kohlendioxid-Emission – Schritt für Schritt schienen sich die USA aus dem Gefüge internationaler Vereinbarungen zu verabschieden, das sie einst maßgeblich mit aufgebaut hatten. Die sich verschärfende Debatte im Sicherheitsrat der Vereinten Nationen zur Irak-Krise und der Beginn des Krieges haben nun auch der breiten Weltöffentlichkeit verdeutlicht, dass die USA unter allen Umständen ihren Status als einzige Supermacht nutzen wollen, um die Welt nach ihren eigenen Vorstellungen zu gestalten.

Dieser dramatische Politikwandel hat eine Vielzahl von Reaktionen hervorgerufen, die von Irritationen und Ablehnung bis hin zu unverhohlenem Zorn reichen. Das gilt besonders für die europäischen Bündnispartner, die nach den gravierenden Veränderungen in den transatlantischen Beziehungen noch keine gemeinsame Position gefunden haben. Vieles, was dazu auf politischer oder öffentlicher Ebene gesagt wurde, war nicht zur Versachlichung der Diskussion geeignet.

Genau dazu will Gert Krell, Professor am Institut für Vergleichende Politikwissenschaft und Internationale Beziehungen der Universität Frankfurt, einen Beitrag leisten. Seine Arbeit, die zwei Monate vor Ausbruch des Krieges abgeschlossen wurde, ist als Fachpublikation deklariert, aber auch für ein breiteres Publikum lesbar. Der Titel ist nicht nur ein Sprachspiel: Ebenso wie die Arroganz jenseits des Atlantiks beschreibt der Autor diejenige in Europa, speziell in Deutschland.

Krell führt den Strategiewechsel in den USA auf eine »konservative Revolution« zurück, die nach dem Ende des Ost-West-Konflikts in der politischen Elite der USA stattfand. Ihre Grundzüge nennt er in deutlichen Worten: »Die USA werden alles daran setzen, ihren militärischen Vorsprung aufrecht zu erhalten. … Die USA sollen so weit überlegen sein, dass die anderen gar nicht den Versuch wagen aufzuholen.« Und: »Internationale Regeln, Verträge und Bündnisse erfahren eine deutliche Abwertung gegenüber dem Primat der Handlungsfreiheit.«

Zur »Grand Strategy« gehöre weiter eine Dramatisierung neuer Bedrohungen, denen mit Abschreckung allein nicht mehr beizukommen sei. Umfragen belegen, dass die Menschen diesseits und jenseits des Atlantiks Terrorismus, islami-

wissenschaft-online

Home | Kontakt | Hilfe | AGB | Ihr Konto | Login | Warenkorb

Fachwissen | Nachrichten | Community | Unterhaltung | Service | Science-Shop

Bücher und CD-ROMs | Science & Fun | Software | Zeitschriften | Abonnements | Reisen | Warenkorb

Fachgebiete
Archäologie
Astronomie
Biologie
Chemie
Geowissenschaften
Mathematik
Medizin
Physik
Technik

Science-Shop

Bücher | Zeitschriften | Science & Fun | Software | Reisen | Abonnements

Unsere Tipps im Mai!

Kinderleichte Antworten auf die schwierigsten Fragen der Welt

Ulla Steuernagel/Ulrich Janßen

■ Die Kinder-Uni

Forscher erklären die Rätsel der Welt

Illustr. v. Klaus Ensikat, 2003, 200 S. m. Abb., Halbleinen, DVA. Bestell-Nr. 1458. € 19,90

Wer sich nicht abgewöhnen will, „warum?“ zu fragen, für den ist die „Kinder-Uni“ ein unterhaltsames und gelehrtes Wissensbuch. Aus dem Vorlesungsverzeichnis: Warum sind die Dinosaurier ausgestorben? Warum speien Vulkane Feuer? – Warum gibt es Arme und Reiche?

Quadratische Männer? Rechteckiges Dosenbier?

Ian Stewart

■ Flacherland

Die unglaubliche Reise der Vikki Line durch Raum und Zeit

2003, 384 S. m. zahlr. Abb., geb., Beck Verlag. Bestell-Nr. 1457. € 24,90

Willkommen in Flacherland, der Zwei-Dimensionen-Welt. Bevölkert wird diese Welt von Quadraten, Dreiecken und Linien, ansonsten schlägt man sich mit den gleichen Problemen herum wie bei uns. Mit „Flacherland“ hat Ian Stewart eine der ungewöhnlichsten Einführungen in die Welt der Mathematik und Physik geschrieben.

Ein Spiegelteleskop zum Selberbauen!

Klaus Hünig

■ Das Newton-Spiegelteleskop plus Sonnenfilter-Vorsatz

Kartonbausatz für ein voll funktionstüchtiges Spiegelteleskop mit 9 – 30 facher Vergrößerung. 2003, SunWatch. Bestell-Nr. 1425. € 22,90

Tubuslänge: 440 mm, Tubusöffnung: 60 mm. Der Hauptspiegel aus geschliffenem und poliertem Glas mit 70 mm Durchmesser und 450 mm Brennweite, wird speziell von BAADER hergestellt. 3 Okulare mit Linsen aus Acrylglas sorgen für 9- bis 30fache Vergrößerung und ermöglichen den Anblick von Mondkratern und von Jupitermonden. Für die Beobachtung von Sonnenflecken ist ein Sonnenfilter-Vorsatz mit BAADER AstroSolar(TM) Sonnenfilterfolie dabei.

Geheimnisse der Quanten

Anton Zeilinger

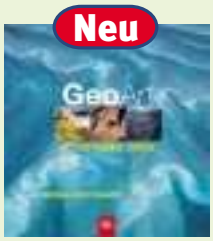
■ Einsteins Schleier

Die neue Welt der Quantenphysik

2003, 256 S. m. zahlr. graph. Darst., geb., Beck Verlag. Bestell-Nr. 1456. € 19,90

Wieso verhalten sich Teilchen als Wellen? Weshalb ist diese Welt überhaupt so – so seltsam? In diesem Buch erläutert einer der bedeutendsten Physiker unserer Zeit die zentralen Aussagen der Quantenphysik und reflektiert ihre revolutionären Auswirkungen auf unser Weltbild.

„Zeilingers Experimente stoßen an die Grenze des Vorstellbaren“ Berliner Zeitung



Sparen Sie € 50,–!

Bernhard Edmaier

■ Geo-Art, Kunstwerk Erde

Texte v. Angelika Jung-Hüttl

Sonderausgabe, 2002, o. Pag., mit zahlr. Farbfotos auf Taf., geb., BLV. Bestell-Nr. 1476. ***Statt € 75,– nur € 25,–***

Der prachtvolle Bildband zum einmaligen Sonderpreis. Die Ästhetik der unbelebten Natur ist zentrales Thema der Fotografien. Luftaufnahmen zeigen unsere Erde – ein verblüffendes Wechselspiel der Farben, Formen und Strukturen. Ausgezeichnet mit dem KODAK-Fotobuch-Preis.

Warum wir Gott einfach nicht los werden

Andrew Newberg/Eugene D'Aquili/Vince Rausch

■ Der gedachte Gott

Wie Glaube im Gehirn entsteht

2003, 260 S., geb., Piper Verlag. Bestell-Nr. 1422. € 19,90

Mediziner haben den Ursprung der Religion im menschlichen Gehirn lokalisiert. Ihr sensationeller Befund: Es gibt eine Hirnregion, die für religiöse Gefühle zuständig ist. Ob betende Christen oder meditierende Buddhisten – es werden die gleichen Hirnzellen auf die genau gleiche Art aktiviert. Verständlich und präzise stellen die drei Autoren den neuesten aufregenden Aspekt der Hirnforschung dar.

Ein Roman für kluge Köpfe ab 14 Jahren

Frank Vermeulen

■ Der Herr Albert

Ein Roman über Einsteins Gedankenexperimente

2003, 416 S., Halbleinen, Gerstenberg. Bestell-Nr. 1473. € 22,–

Als Esther 15 wird, bekommt sie ein Foto, das niemand anderen als Einstein zeigt und das er ihrem Großvater persönlich gewidmet hat. Esther lernt sich in der irren und doch absolut logischen Welt Einsteins zu bewegen – und mit ihr die Leser dieses Buches. Wer das Buch gelesen hat, weiß, was es mit der Relativitätstheorie auf sich hat, von der so viele Leute reden und die das physikalische Weltbild unserer Zeit so nachhaltig geprägt hat.

Vor 50 Jahren wurde die DNS entschlüsselt!

Werner Bartens

■ Dem Leben auf der Spur

Biografie einer Entdeckung. 50 Jahre Entschlüsselung der DNS.

2003, 222 S., geb., DVA. Bestell-Nr. 1477. € 19,90

Am 23. April 1953 veröffentlichten James Watson und Francis Crick die Entschlüsselung der DNS-Struktur. Es war ein Meilenstein in der biologischen Forschung und eine der wichtigsten Entdeckungen des 20. Jahrhunderts. Werner Bartens erzählt die Geschichte dieser Entdeckung und die Geschichten der Entdecker: wer die Forscher sind und was sie antreibt. Spannende Forschungsgeschichte lebendig erzählt.

Weitere interessante Titel finden Sie im Internet:

www.science-shop.de

Besuchen Sie uns!

Bequem bestellen:

➜ direkt bei
www.science-shop.de

➜ telefonisch
06221/9126-841

➜ per E-Mail:
shop@wissenschaft-online.de

➜ per Fax:
06221/9126-869

Alle Preise verstehen sich inklusive Umsatzsteuer. Für den Versand berechnen wir Ihnen eine Pauschale von € 3,– (Ausland € 7,–)

schen Fundamentalismus, Massenvernichtungswaffen im Irak oder China als neue Weltmacht nach ihrer Gefährlichkeit in eine ähnliche Reihenfolge bringen. Aber die US-Bürger fühlen sich insgesamt weit mehr bedroht als die Europäer. Nach den Anschlägen vom 11. September 2001 sei es deshalb den Verfechtern der neuen Strategie relativ leicht gefallen, das diffuse Bedrohungsgefühl auf Osama bin Laden und Saddam Hussein zu fokussieren.

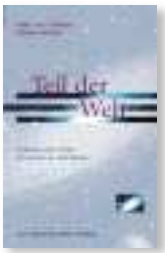
Wie kam es zu dieser weltpolitischen Konzeption? Worin liegen die Differenzen zur Strategie der Europäer? Krell diskutiert mehrere Deutungen. Dabei mahnt er die Europäer, mit Kritik an den USA vorsichtig zu sein. Denn in Fragen der inneren und äußeren Stabilität habe sich eine Arbeitsteilung eingestellt, die für die Europäer ziemlich bequem sei: Nur die Sicherheitsgarantien der Militärmacht USA hätten es Europa ermöglicht, sich zu vereinigen und die Akzente auf »sanfte« Methoden der Machtpolitik zu legen. Die Irak-Kontroverse sei nur das jüngste Beispiel für eine mangelnde Abstimmung zwischen der »hard power« USA und der »soft power« Europa.

Die Defizite europäischer Politik zeigt Krell am Beispiel Deutschland auf. Gab es eine Strategie für den Umgang mit dem Irak für den Fall, dass die UN-Inspektoren Massenvernichtungswaffen finden würden? Oder für den Fall, dass sie eben nicht fündig würden und ein Krieg vermeidbar gewesen wäre? Es reiche nicht, schreibt Krell, gute Gründe gegen fragwürdige Strategien vorzubringen – man müsse auch glaubwürdige Alternativen anbieten können.

Krells Studie sei allen Lesern – unabhängig von ihrer eigenen Haltung – zur Lektüre empfohlen. Das geht auch bequem per Internet: http://www.hsfk.de/downloads/rep0103.pdf

Uwe Reichert

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



KYBERNETIK UND ETHIK

Heinz von Foerster und Monika Bröcker

Teil der Welt

Fraktale einer Ethik – ein Drama in drei Akten

Carl Auer, Heidelberg 2002. 368 Seiten, € 38,–

Dieses Buch ist ein Buch über die Entstehung dieses Buches. Diese Rückbezüglichkeit ist kein Zufall, sondern Programm. Denn Rückkopplungsschleifen sind Hauptgegenstand der Kybernetik, die von Steuerungs- und Kommunikationsprozessen bei Tieren, Menschen und Maschinen handelt. Als ihr Vater gilt der Mathematiker Norbert Wiener (1894–1964); für ihre Weiterentwicklung und Verbreitung sorgte ganz wesentlich der Physiker Heinz von Foerster.

In Deutschland ist »Wissen und Gewissen – Versuch einer Brücke« wohl sein bekanntestes Buch. In vielen, auch in den Geisteswissenschaften sehr beachteten Arbeiten über die Eigenschaften natürlicher und technischer Systeme schuf er Grundlagen für die Entwicklung von Computern und künstlicher Intelligenz sowie für das Verstehen der menschlichen Kommunikation und der Organisation menschlichen Zusammenlebens.

Der in Wien geborene Heinz von Foerster gab nach dem Zweiten Weltkrieg der experimentellen Kognitionsforschung in den USA eine völlig neue Richtung: Das Verhalten eines lebendigen Organismus wird weder monokausal von innen noch von außen gesteuert, sondern der Organismus steuert sich selbst, indem er Eigenverhalten bildet. Dieser Prozess kann als mathematische Iteration verstanden werden, die gegen einen Fixpunkt strebt; er ist unter den Namen »Autopoiese« und »Selbstorganisation« populär geworden. Erst heute, nachdem wesentlich einfachere mathematische Iterationen in den Fraktalen eine eingängige bildliche Darstellung gefunden haben, wird die Bedeutung dieser neuen Sichtweise allmählich erkannt und gewürdigt.

Heinz von Foerster entfaltete seine Auffassungen in der Auseinandersetzung mit der frühen Kybernetik und deren Gründervätern Norbert Wiener und Warren S. McCulloch (1898–1972). Er gründete und leitete fast zwanzig Jahre das Biological Computer Laboratory an der University of Illinois in Urbana-Champaign (südlich von Chicago), ein Zentrum, an dem Physiker, Mathematiker, Biologen, Mediziner, Techniker und Philosophen gemeinsam logischen und methodischen Problemen nachgingen, die das Erkennen des Erkennens aufwirft.

Monika Bröcker, einer freien Wissenschaftlerin und Autorin, die seit 1998 eng mit von Foerster zusammenarbeitet, ist es durch hartnäckiges Fragen gelungen, ihrem Helden neben einer sehr verständlichen populärwissenschaftlichen Darlegung seiner Hauptgedanken seine bislang ausführlichste Biografie zu entlocken.

Am meisten besticht an diesem Buch die Einheit von Inhalt und Form. Seine Dialogform weckt Assoziationen zu den überlieferten antiken Dialogen von Sokrates, den Unterredungen von Galileo Galilei und den Gesprächen des ebenfalls prominenten Kybernetikers und Systemtheoretikers Gregory Bateson (1904–1980) mit seiner Tochter, die dieser in seinem Buch »Ökologie des Geistes« als »Metaloge« bezeichnete.

Mai und Heinz von Foerster

Im ersten Akt suchen Autor und Autorin nach der geeigneten Darstellungsform. Ein Blick hinter die Kulissen wird gewährt, und die Bühne wird ausgemessen. Dann erfolgt eine Art Tango um die Themen Ky-

bernetik, Ethik und Konstruktivismus: Fragen und Gegenfragen wechseln sich mit »Biss« ab. Provozierende Angriffe werden jäh in respektvoller Empathie gebremst. Dabei werden recht beunruhigende Fragen aufgeworfen: Wenn unsere Welt auf Axiomen beruht, ist dann nicht die Veränderung eines Axioms eine Veränderung der Welt? Wenn wir die Axiome frei wählen können, sind wir dann nicht für diese Welt verantwortlich?

Der zweite Akt widmet sich autobiografischen Erinnerungen und Familiengeschichten Heinz von Foersters. Lesende werden unvermittelt vom Strudel der Umwälzungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts erfasst: Neben philosophischen und naturwissenschaftlichen Ereignissen werden die aufkommende Frauenbewegung, die Entdeckung der fernöstlichen Philosophie und das Zerbröseln bürgerlicher Moralvorstellungen in pointierten Anekdoten illustriert. Es folgen Schilderungen der faschistischen Diktatur, der

Der Organismus steuert sich selbst – über eine Fixpunktiteration

Kriegs- und Nachkriegsjahre sowie der akademischen Kultur in den USA.

Wer je sein ungeduldiges »et cetera, et cetera …« vernahm, wird in der Wiedergabe der Tonbandaufnahmen mühelos den authentischen von Foerster wiedererkennen und zwischendurch nur ungern das Buch aus der Hand legen.

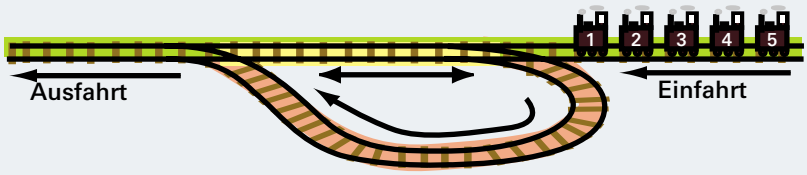
Im dritten Akt gewinnt der Tango noch einmal an Tempo. Verschiedene Konsequenzen der Ideen und Haltungen Heinz von Foersters für Therapie, Management, Erziehungs- und Computerwissenschaft werden diskutiert.

Heinz von Foerster ist am 2. Oktober 2002, kurz vor seinem 91. Geburtstag, in seinem Haus in Pescadero (Kalifornien) verstorben. Die Nachrufe weisen zu Recht darauf hin, dass seine technischen Erfindungen, seine Beiträge zur Kybernetik, Wissenschafts- und Erkenntnistheorie maßgeblichen Einfluss auf das zwanzigste Jahrhundert genommen haben. Diese Beiträge werden in einer immer komplexer werdenden Welt zunehmend an Bedeutung gewinnen.

André Frank Zimpel

Der Rezensent ist Professor am Institut für Behindertenpädagogik der Universität Hamburg; er forscht seit mehr als zwanzig Jahren auf dem Gebiet nicht-linearer Lerntheorien.

PREISRÄTSEL



Zugkombinationen

Von Pierre Tougne

Fünf Lokomotiven mit den Nummern 1 bis 5 stehen auf dem Abstellgleis (Bild oben, rechts), das in eine Rangierschleife mündet. Im gelben Gleisabschnitt darf gehalten und die Fahrtrichtung gewechselt werden. Es haben alle fünf Loks darauf Platz. Im grünen Bereich ist die Fahrtrichtung durch den Pfeil vorgeschrieben, aber es darf gehalten werden. Das rote Gleis muss in Pfeilrichtung und ohne Halt durchfahren werden.

Um beispielsweise den Zug 21345 zusammenzustellen, lässt der Bahnhofsvorsteher zuerst die Loks 1 und 2 auf das gelbe Gleisteil fahren, durchfährt mit ihnen anschließend die Schleife und lässt die Loks 3, 4 und 5 über das gerade Gleis nachrücken. Die fünf Lokomotiven würden sich theoretisch auf 5! = 120 mögliche Arten zu einem Zug zusammenstellen lassen – durch die Rangiervorschriften können allerdings dreißig Züge nicht zusammengesetzt werden. Welche sind dies?

Damit Sie nicht alle dreißig Züge aufschreiben müssen, empfehlen wir folgende Kurzschreibweise: 3(124)5 steht für die sechs Züge mit Lok 3 am Anfang, Lok 5 am Ende und allen sechs Reihenfolgen der Loks 1, 2 und 4 in der Mitte. Dieses Beispiel hat aber nichts mit der Lösung zu tun!

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Bechersets »Balance«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. Mai 2003, eingehen.

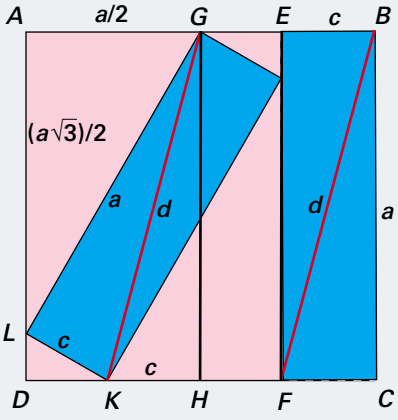
Lösung zu »Die Bastelarbeit« (März 2003)

Paula muss einen Streifen der Breite $c=(2-\sqrt{3})a$ abschneiden.

Klaus Lagally aus Stuttgart betrachtete die geometrischen Verhältnisse der Geburtstagskarte genauer: Die Diagonalen d sind nach Voraussetzung gleich lang. Damit sind die Dreiecke KHG und FCB kongruent und damit $KH=EB=LK=c$. Außerdem ist $DK=GE$, und aus $AG=DK+KH=GE+EB=GB$ folgt $AG=a/2$. Damit ist das Dreieck AGL die Hälfte eines gleichseitigen Dreiecks mit der Seitenlänge a; dessen Höhe ist also $AL=(a\sqrt{3})/2$. Die Dreiecke AGL und DLK sind ähnlich. Damit gilt $LK/LG=LD/AG$.

Durch Einsetzen folgt:

$$\frac{c}{a}=\frac{a-\frac{a\sqrt{3}}{2}}{\frac{a}{2}} \quad \Rightarrow \quad c=a(2-\sqrt{3})$$



Die Gewinner der drei Strategiespiele »Planetarium« sind Klaus Lagally, Stuttgart; Heike Rascher, Berlin; und Harald Lermen, Tholey.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

ÖKOLOGIE

Peder Anker

Imperial Ecology

Environmental Order in the British Empire, 1895–1945

Harvard University Press, Cambridge, MA 2002. 343 Seiten, $ 59,95

Die Ökologie genießt gemeinhin den Ruf, transparent und objektiv zu beschreiben, wie Natur ohne menschliche Eingriffe aussieht. Diese Vorstellung ist in den vergangenen Jahren radikal in Frage gestellt worden. Gegenwärtig bietet die Ökologie weder ein unverfälschtes Originalbild einer ursprünglichen Natur noch neutrale Handlungsanweisungen, sondern Deutungen und Rezepte, die historisch, politisch und kulturell mitbedingt sind. Im vorliegenden Werk gibt der norwegische Wissenschaftshistoriker Peder Anker eine moderne Beschreibung dieser Wissenschaft, die von seinen Fachkollegen immer noch stiefmütterlich behandelt wird.

Anker zeigt, wie die Ökologie, die vor allem die Verbreitung von Pflanzen untersucht hatte, in der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts sowohl menschliche als auch natürliche »Gemeinschaften« als Forschungsobjekte entdeckte. Ihre einflussreichsten Vertreter waren Arthur Tansley, der Schöpfer des Begriffs »Ökosystem«, der Tierökologe Charles Elton, der Zoologe und Schriftsteller Julian Huxley und der südafrikanische Politiker und Botaniker Jan Christian Smuts.

Smuts und seine Anhänger formulierten eine ganzheitliche Ökologie, während die britische Schule eine eher reduktionistische, mechanistische Betrachtungsweise vertrat. Beide Lager banden in ihren Theorien den Menschen in den Naturhaushalt ein und fanden damit einen Weg, globale politische Ambitionen zu entwickeln, und zwar die natürlichen und menschlichen Ressourcen ihrer Imperien effizient zu verwalten und zu nutzen. Anker belegt überzeugend die These, entscheidende Aspekte der modernen Ökologie seien aus dem Kolonialismus und dem Nord-Süd-Gegensatz erwachsen.

Tansley, Huxley und ihre britischen Weggefährten strebten eine Welt ohne Geschichte an, eine Welt, in der politisches Handeln nicht mehr frei, sondern von den Notwendigkeiten ökologischen Haushaltens bestimmt ist. Das heimatliche, nicht durch Großstädte verunstaltete Paradies und die versorgenden Kolonien sollten einer strikten Kontrolle unterliegen, und in der globalen »Verwaltung« war den Ökologen eine prominente Stellung zugedacht.

In Südafrika sollte die Ökologie dazu dienen, die Apartheid als naturgegeben zu rechtfertigen. Jede Rasse hatte angeblich eine ihrem körperlichen und psychologischen Entwicklungsstand angemessene ökologische Nische, in der sie dem harmonischen Ganzen dienlich sein konnte. Nach Smuts war es ein Gebot der Fairness, jeder Volksgruppe eine »natürliche« Entwicklung innerhalb ihrer Umwelt zu gewährleisten.

Nach dem Zusammenbruch der Imperien richtete sich der Ehrgeiz der Ökologen zum einen auf die neuen Nationalstaaten und zum anderen auf die Vereinten Nationen: Tansley verschrieb sich dem Naturschutz in Großbritannien, Huxley wurde erster Generalsekretär der UNESCO, und Smuts diente sich ebenfalls der UN an. Das Buch überrascht wiederholt mit unerwarteten Einsichten: Als ergebener Anhänger Sigmund Freuds nutzte Tansley psychoanalytische Theorien bei der Formulierung des Ökosystem-Konzeptes; Smuts baute in seinen Entwurf für die Präambel der UN-Charta rassistische Ideen ein.

Manchen seiner Ansprüche wird Anker nicht vollständig gerecht. Die geografische Beschränkung auf das britische Kolonialimperium hindert ihn daran, eine wirklich globale Perspektive einzunehmen und Forschungsansätze in anderen Ländern, wie etwa den Vereinigten Staaten oder Deutschland, zu beleuchten.

Peder Ankers gleichwohl faszinierende und ungemein wichtige Studie erschöpft ihre Bedeutung nicht in der historischen Erkenntnis. Denn das so modern erscheinende Motto »Think globally, act locally« diente schon Ökologen im britischen Kolonialreich als nützliche Handlungsmaxime. Auch wenn im postkolonialen Zeitalter offen paternalistische und unterdrückerische Maßnahmen kaum noch eine Rolle spielen, ist der globale Umweltdiskurs sowohl auf der Pro- als auch auf der Anti-Globalisierungsseite immer noch geprägt von wissenschaftlichen und politischen Konzepten des Westens. ▷

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Hansjörg Küster

Die Ostsee

Eine Natur- und Kulturgeschichte

Beck 2002, 357 Seiten, € 34,90

Bei der Ostsee, dem »Mare Balticum«, ist es schwer, bei allem Erzählenswerten den Blick auf das Gesamtbild nicht zu verlieren. Wie in einem Geschichtsbuch spannt Küster den Bogen von der Entstehung der geologisch jungen Ostsee über die ersten Ackerbauern, die Bronze- und Eisenzeit, die zahlreichen Hansestädte bis hin zur kulturellen Wiederentdeckung der Ostsee in den vergangenen Jahren. Wer sich gemeinsam mit dem Verfasser auf eine Zeitreise begeben möchte, darf nicht ungeduldig sein, sondern muss sich Zeit nehmen. Ein empfehlenswertes Buch, an dem Ostseekenner und alle, die es werden wollen, aufgrund der vielfältigen Themen ihre Freude haben werden.

Daniel C. Dreesmann

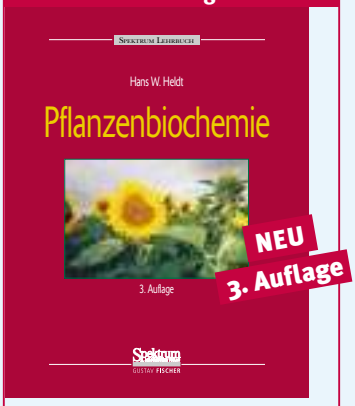
5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■
Lesespaß	■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	22

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

Spektrum-Standardwerke

Biowissenschaften

Eine exzellente Einführung für Einsteiger!



NEU 3. Auflage

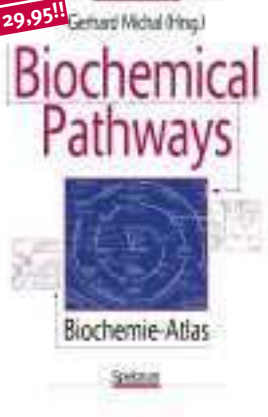
Hans W. Heldt

Pflanzenbiochemie

Der Autor spannt den Bogen von der Photosynthese über Primär- und Sekundärstoffwechsel sowie Phytohormone bis hin zu aktuellen Themen wie Molekulargenetik und Gentechnik. Kompetent und verständlich in der Darstellung sowie mit sorgfältig erstellten zweifarbigen Abbildungen erfüllt es einen hohen didaktischen Anspruch und reiht sich unter die besten Biochemie-Lehrbücher.

3. Aufl. 2003, 650 S., geb.
€ 49,95, ISBN 3-8274-1330-3

Früher € 59,95 jetzt € 29,95!!



Gerhard Michal (Hrsg.)

Biochemical Pathways

Auf der Grundlage der weltbekannten „Biochemical Pathways", des „Boehringer-Posters", entstand dieses Buch. Beiträge renommierter Wissenschaftler behandeln sämtliche relevanten Themen aus dem Bereich Biochemie/Molekularbiologie auf dem aktuellen Stand der Forschung. Eine Vielzahl 6-farbiger (!) Grafiken veranschaulicht die überaus komplexen biochemischen Vorgänge.

1998, 276 S., 220 Abb., geb.
Früher **€ 59,95**, jetzt: **€ 29,95**
ISBN 3-86025-239-9

Der neue STRYER !!

J. M. Berg / J. L. Tymoczko / L. Stryer

Biochemie

Um Biochemie zu lernen, bietet seit jeher der „Stryer" den einfachsten und klarsten Weg an. Mit der vollständig überarbeiteten und aktualisierten Neuauflage setzt dieses Standardwerk erneut Maßstäbe. Inhaltlich wie didaktisch auf der Höhe der Zeit, stellt das weltweit bewährte Lehrbuch die **gesamte Bandbreite des Faches** in einer überaus ansprechenden und klaren Art und Weise dar.

»Allen Lernenden und Lehrenden auf dem Gebiet der Biochemie, Biologie und Medizin ohne Einschränkung zu empfehlen.« Biologie in unserer Zeit

5. Aufl. 2003, 1.200 S., geb.
€ 79,95, ISBN 3-8274-1303-6

Superlative der Natur !

NEU 6. Auflage

Rainer Flindt

Biologie in Zahlen

Für alle, die mehr über Größe, Gewicht oder Lebensdauer von Zellen, Organen, Tieren oder Pflanzen wissen wollen, ist dieses Werk eine unerschöpfliche Fundquelle. Statt aufwendig in Standardwerken zu blättern und sich durch Texte zu wühlen, sind jede Menge Superlative und Vergleichswerte prompt zur Hand. Der unglaubliche Reichtum unserer Lebensumwelt ist hier geballt greifbar, lässt grübeln, staunen – und immer wieder schmunzeln!

»Mit seinen Hunderten Tabellen und über 10.000 Einzelwerten gleicht das Werk einem inoffiziellen Guinness-Buch der Rekorde des Tier- und Pflanzenreichs.« Focus

6. Aufl. 2003, 296 S., 12 Abb., br.
€ 24,95, ISBN 3-8274-1171-8

Endlich ist es soweit: Campbells *Biologie* in Neuauflage!!

NEU 6. Auflage

Neil A. Campbell

Biologie

Das im englischsprachigen Raum erfolgreichste aller großen Biologie-Lehrbücher hat auch in Deutschland bereits über 50.000 Liebhaber gefunden. Das gewichtige Buch begleitet jeden Biologie-Studenten wie auch Tausende von Biologie-Interessierten als zuverlässiger Begleiter durch Studium, Schule und zu Hause. Die neue 6. Auflage veranschaulicht die komplette Biologie mit all ihren Teilfächern: Biochemie, Zellbiologie, Genetik, Mikrobiologie, Evolution, Biodiversität, Botanik, Zoologie und Ökologie – farbig und lebendig. Neben dem klaren, durchgehend aktualisierten Text und einem präzisen Glossar erleichtern Schlüsselsätze und Quizfragen das Selbststudium und die Prüfungsvorbereitung. Neue selbst erklärende und aufeinander aufbauende Grafiken sowie Hinweise auf moderne Forschungsansätze führen durch die multidisziplinäre Landschaft dieser dynamischen Fachrichtung.

Und nicht zuletzt: Käufer dieses Standardwerkes erhalten automatisch und kostenlos einen personalisierten Zugang für ein Jahr zu dem (ansonsten kostenpflichtigen) Nachrichtenservice von *Wissenschaft Online* – mit tagesaktuellen Informationen aus Wissenschaft und Technik, Beiträgen aus *Spektrum der Wissenschaft* u. v. m.

6. Aufl. 2003, 1.606 S., ca. 2.000 Abb., geb.
€ 89,95, ISBN 3-8274-1352-4

Bitte kopieren und faxen an: 06221-9126338

Ja, ich bestelle!

		€
❑ Biologie	3-8274-1352-4	89,95
❑ Biochemie	3-8274-1303-6	79,95
❑ Biologie in Zahlen	3-8274-1171-8	24,95
❑ Pflanzenbiochemie	3-8274-1330-3	49,95
❑ Biochemical Pathways	3-86025-239-9	29,95

Preise zzgl. Versandkostenpauschale von € 3,50 pro Lieferung (Inland)
Buchpreise enthalten 7% MwSt, Preise für CD-ROMs 16% MwSt.

sdw5/03

Absender:

Name / Vorname

Straße

PLZ / Ort

E-Mail-Adresse

Datum / Unterschrift

Spektrum AKADEMISCHER VERLAG

www.spektrum-verlag.de

Bestellen können Sie per Tel.: 07071/93 53 69 • per Fax: 06221/9126338 • per Mail: shop@spektrum-verlag.de

Lokale Landnutzer erleben ihre Umwelt oft völlig anders, als gängige Begriffe wie »Entwaldung«, »Erosion« oder »Überweidung« vermuten lassen. Das Wald-Savannen-Mosaik in Westafrika ist für westliche Umweltschützer ein untrügliches Zeichen für fortschreitenden Waldverlust. Für die einheimischen Bauern hingegen sind die Waldflecken dadurch entstanden, dass sie oder ihre Vorfahren Bäume in eine ursprüngliche Savanne pflanzten.

Unter solchen Umständen kann Ökologie immer noch als Werkzeug fremder Perspektiven und Interessen, als Mittel der Freiheitseinschränkung erfahren werden. Früher geschah diese Einmischung zum Wohle der Kolonialmacht, heute zum Wohle einer als globales Erbe betrachteten Umwelt, die der Verfügung ihrer traditionellen Nutzer entzogen wird. Und dieses Erbe wird verwaltet mit oft ahistorischen Vorstellungen, wie ein tropischer Wald, eine Savanne oder Berghänge im Himalaya »eigentlich« aussehen sollen.

Thomas P. Weber

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Tierökologie der Universität Lund (Schweden) und Buchautor.

BIOGRAFIE

Ernst Peter Fischer

Am Anfang war die Doppelhelix

James D. Watson und die neue Wissenschaft vom Leben

Ullstein, München 2003. 327 Seiten, € 22,–

Gerade mal 25 Jahre alt war James D. Watson, als er, gemeinsam mit seinem Kollegen Francis H. C. Crick, die Molekülstruktur der DNA entschlüsselte – eine Leistung, für die der Wissenschaftler wenige Jahre später mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde. Die Entdeckung der Doppelhelix, die ihn schon in jungen Jahren berühmt machte, ist ein Meilenstein in der Geschichte der Molekularbiologie. Für Watson, der als erfolg- und einflussreichtster Biologe der Neuzeit gilt, war sie jedoch nur der Beginn einer langen Karriere. Denn er hat seither unermüdlich geforscht, gelehrt und publiziert und dadurch die Biowissenschaften nachhaltig geprägt – zuletzt zu Beginn der neunziger Jahre, als er dem noch in den Kinderschuhen steckenden Humangenomprojekt den entscheidenden Anstoß gab.

Ernst Peter Fischer ist nicht der erste Autor, der es sich zur Aufgabe gemacht hat, den Lebensweg dieses ungewöhnlichen Wissenschaftlers nachzuzeichnen. Und doch ist ihm ein ganz besonderes Buch gelungen. Der diplomierte Physiker und promovierte Biologe hat Watson während seiner eigenen wissenschaftlichen Tätigkeit persönlich kennen gelernt. Dadurch kann er immer wieder amüsante Anekdoten aus dem Leben seines Helden einstreuen und dessen typische Charakterzüge glaubwürdig schildern, so dass die Ikone der Molekularbiologie für die Leser greifbar und lebendig wird. Und dabei holt er auch noch erfreulich weit aus: Er beginnt mit der Kindheit des Ausnahmeforschers, der schon in ganz jungen Jahren eher ungewöhnlich war und seine Zeit mit Büchern und dem Beobachten seltener Vögel verbrachte – was ihm zu erster Berühmtheit in einem Quiz-Programm eines lokalen Radiosenders verhalf.

Doch Fischer beschränkt sich nicht auf oberflächliches Plaudern. Er widmet sich detailliert der Arbeit Watsons als Forscher, Lehrer und Buchautor und vergisst auch nicht, die Arbeit seiner Mitstreiter und Konkurrenten gebührend zu würdigen. Dabei gelingt es ihm, die oftmals komplexen Sachverhalte verständlich aufzuarbeiten und sie – mithilfe einer Vielzahl von Informationskästen – in leicht verdaulichen Häppchen zu servieren.

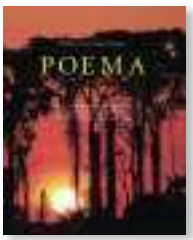
Schade ist nur, dass der Autor auf den ersten fünfzig Seiten immer wieder sein eigentliches Thema aus den Augen verliert und sich stattdessen zu langatmigen Ausführungen über das Wie und Warum

James D. Watson in seinem Labor mit einem Modell der DNA, 1962

dieser Biografie hinreißen lässt. Doch glücklicherweise ist die anfängliche Durststrecke schnell überwunden und weicht dem puren Lesegenuss.

Stefanie Reinberger

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



ÖKOLOGIE

Manfred Linke und Rainer Osnowski

POEMA

Die leise Rückkehr des Regenwaldes

LKO, Köln 2002. 159 Seiten, € 29,90

Der freiberufliche Fotograf Manfred Linke und der Autor Rainer Osnowski reisen seit 1986 regelmäßig nach Brasilien, insbesondere nach Amazonien. Somit konnten sie das 1992 gegründete Projekt POEMA (»Programa Pobreza e Meio Ambiente na Amazônia«, Armut und Umwelt in Amazonien) von Anfang an begleiten. Zum zehnjährigen Bestehen dieses Projekts erscheint dieser Bildband.

Die Grundidee lässt sich rasch darstellen. Eine wesentliche Ursache der ökologischen Verwerfungen und der Vernichtung des Regenwaldes liegt in der Armut der dort lebenden Menschen.

▷ Wanderbauern brandroden Teile des wertvollen Regenwaldes in Amazonien. Da ihnen agrarökonomische Kenntnisse fehlen und die Regierung kein entwicklungspolitisches Konzept hat, bauen sie Monokulturen an.

Die Folgen sind bekannt: In kurzer Zeit ist die dünne Humusschicht ausgelaugt, und nur eine nackte Erosionslandschaft bleibt zurück, was die Kleinbauern zwingt, tiefer in den Regenwald zu ziehen und den Kreislauf der Zerstörung weiterzuführen. In Amazonien werden jährlich knapp zwei Millionen Hektar Wald vernichtet, was sieben Fußballfeldern pro Minute entspricht.

Das Projekt POEMA (die Abkürzung ist auch das portugiesische Wort für »Gedicht«), das an die Bundesuniversität von Pará in Belém angegliedert ist, hat sich zum Ziel gesetzt, den Einheimischen einen Ausweg aus der Armut und eine ökonomische Perspektive zu bieten, ohne dass dem Regenwald weiterer ökologischer Schaden zugefügt wird. Wanderfeldbauern sollen sesshaft gemacht werden, was zugleich den sozialen Druck auf die Slums am Rande der Großstädte reduzieren würde; Waldinseln sollen den ökologischen Schaden durch Brandrodung in Grenzen halten. Naturgerechter Anbau, die Versorgung mit sauberem Wasser und die Einbindung in den Welthandel werden als Ziel verfolgt. So werden Naturfasern aus Kokosnüssen für die Automobilproduktion in Brasilien verwendet, was den beteiligten Gemeinden eine wirtschaftliche Entwicklung ermöglicht.

Die mittlerweile herrschende Lehre in der Entwicklungspolitik, eine nachhaltige Entwicklung zu fördern, wird durch dieses Projekt ideal umgesetzt. Oft sind Armut und ökologischer Verfall nur Ausdruck mangelnden Wissens. Durch den *Land Grant Act* von 1862 wurden in den USA mehrere »Agricultural and Mechanical Universities« gegründet und zugleich verpflichtet, wissenschaftliche Beratung für Handwerk und Landwirte bereitzustellen. Die Texas A & M University ist nur die bekannteste dieser Hochschulen. Die Überwindung agrarwissenschaftlicher Probleme und die Förderung der Technologie im Handwerk hat in einem erheblichen Maße zur wirtschaftlichen Entwicklung der USA beigetragen. POEMA verfolgt in Zusammenarbeit mit der Universität in Belém einen ähnlichen Ansatz.

Der Text ist dreisprachig: deutsch, portugiesisch und englisch. Schlaglichtartig werden Initiatoren und einige Lebensbilder dargestellt, beispielsweise Dona Antónia und ihre Freude über sauberes fließendes Wasser oder der Erfolg des Waldinsel-Kleinbauern Don Alfredo.

Die Darstellung ist bilderreich – der größte Teil des Buches besteht aus großformatigen Fotos der Amazonaslandschaft und beteiligter Menschen –, kurzweilig, personenbezogen und ohne größeren intellektuellen Aufwand nachvollziehbar. Allerdings fehlen kritische Bemerkungen – es scheint, als ob das ganze Projekt ohne Probleme funktioniert hätte.

Dieser »Rechenschaftsbericht« erreicht inhaltlich kaum das Niveau eines Geschäftsberichtes, er wirkt mehr wie eine Werbeschrift für POEMA und den guten Gönner DaimlerChrysler, der das Projekt von Anfang an finanziell unterstützt hat und ein Hauptabnehmer von Naturprodukten dieser Amazonasregion ist. Der Anhang bringt einige Daten zur Entwicklung des Projekts, aber man findet keine Zahl, die seine ökonomische Relevanz aufzeigen würde. Es wäre interessant gewesen zu erfahren, wie viele Menschen Arbeit fanden, wie viele Wanderfeldbauern einbezogen wurden – wie hoch die Umsätze und wie hoch das Projektvolumen waren.

Oft sind Armut und ökologischer Verfall nur Ausdruck mangelnden Wissens

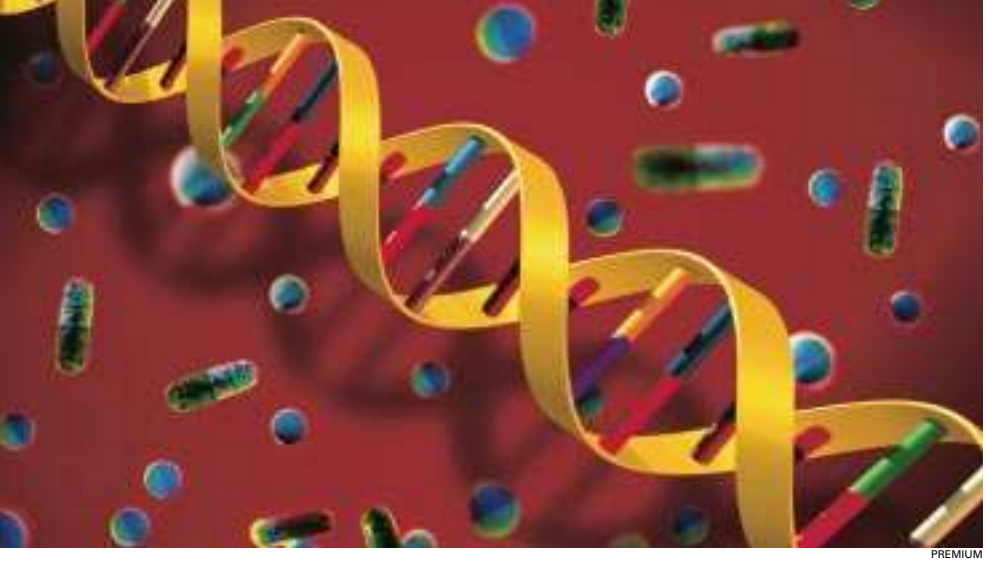
Entwicklungspolitisch gesehen ist die Grundidee völlig richtig. Nachhaltige Entwicklung solch schwieriger ökologischer Regionen wie Amazonien ist nicht gegen, sondern nur mit einer weltweiten Vernetzung und einer Einbindung in die weltweite Marktwirtschaft möglich. Die entwicklungspolitische Relevanz wird im Buch deutlich, wirtschaftspolitische Schlussfolgerungen werden aber kaum gezogen. So bleibt unklar, ob das Projekt verallgemeinerbar ist. Es gibt nur Hinweise auf Ableger in anderen Bereichen.

Das Projekt war wohl deshalb erfolgreich, weil eine Einzelperson mit guten Kontakten die Unterstützung eines wichtigen Partners – DaimlerChrysler – erhielt, wodurch eine gewisse ökonomische Nachhaltigkeit (Absatz der Naturprodukte) erreicht wurde. Schwierigkeiten, die entwicklungspolitische Relevanz des Projektes, Probleme, die im Marktgeschehen auftraten oder auftreten können, werden nicht reflektiert. So wirkt das Buch ein wenig ermüdend, selbstbeweihräuchernd, was bei dem guten Ansatz eigentlich schade ist. Ein bisschen mehr Biss, ein bisschen mehr Kritik, ein bisschen mehr Anreize zum Nachahmen hätten ihm gut getan.

Werner Lachmann

Der Rezensent ist Professor für Wirtschafts- und Entwicklungspolitik und Direktor des Volkswirtschaftlichen Instituts an der Universität Erlangen-Nürnberg in Nürnberg.

▽ **Krabbenfischer im brasilianischen Regenwald**



PREMIUM

WWW.BUNDESTAG.DE/AKTUELL/BP/2000/BP0006/0006004.HTML

So glänzt die DNA auf einer Website des Deutschen Bundestags.

MOLEKULARBIOLOGIE

Molekül des Lebens

Im Internet kann man dem Träger unserer Erbinformation ein ganzes Stück näher kommen.

Von Stefanie Reinberger

Genau fünfzig Jahre sind vergangen, seit das mittlerweile berühmte Forscherduo James D. Watson und Francis H. C. Crick der Welt ein kompliziert wirkendes, aber dennoch elegantes Gebilde präsentierte: das Modell der DNA-Doppelhelix. Ihre Interpretation der Daten hatte ergeben, dass das Erbmaterial aus zwei schraubenartig ineinander verwundenen DNA-Strängen bestehen musste. Bilder des Molekülmodells, das Watson und Crick aus einfachen Labormaterialien konstruiert hatten, sind auf der Seite **http://fachberatungbiologie.de/Themen/molgenetik/seitenmolgen/watsonhistorie.htm** zu bewundern. Gerhard Arnold, Biologielehrer und regionaler Fachberater aus Speyer, stellt reichliches, nicht nur historisches Material bereit.

Sich anhand der alten Aufnahmen eine genaue Vorstellung vom Aufbau unserer Erbsubstanz zu verschaffen, ist jedoch sehr mühsam. Besser geeignet ist ein animiertes DNA-Modell, das ein weiterer ambitionierter Biologielehrer namens Holger Schickor ins Netz gestellt hat (**www.hschickor.de/molgeometrie/DNA.htm**). Die Struktur lässt sich per Mausklick bewegen und von allen Seiten betrachten. Wer es handfester liebt, kann sich unter **www.gentech.at/projekte/MODUL1.pdf** die Bastelanleitung für eine Origami-Doppelhelix ausdrucken.

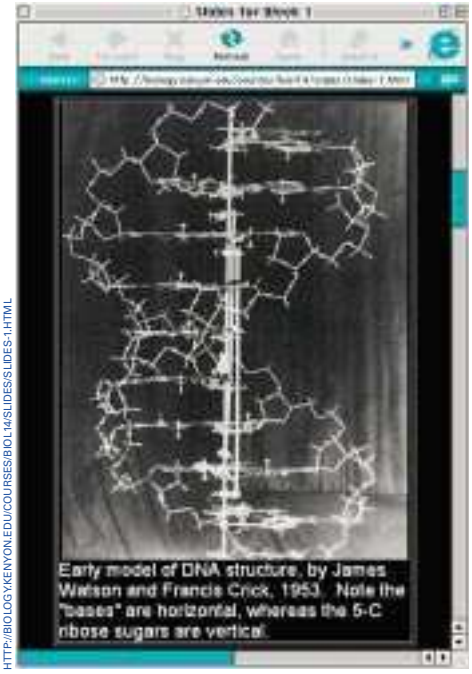
Wie aber funktioniert die DNA? Wie gibt sie die in ihr verschlüsselten Erbinformationen weiter? Wer solchen Fragen nachgehen möchte, ist auf **www.biokurs.de/skripten/13/bs13-1.htm** genau richtig. Hier hat der Biologielehrer Ernst-Georg Beck viel Wissenswertes zusammengetragen und geht auch auf Aspekte der Gentechnologie ein. Ein umfassendes Glossar erläutert Begriffe wie »Replikation«, die mittlerweile zu den Grundvokabeln der Molekularbiologen gehören.

Wie diese DNA-Verdoppelung vor sich geht, wird auf einer ganzen Reihe von Internetseiten erklärt. So stellt das »Gläserne Labor«, eine Einrichtung zur Nachwuchsförderung am Campus Berlin-Buch, unter **www.glaesernes-Labor.de/dna_replikation** eine kurze Filmsequenz zur Verfügung, in der dieser Vorgang simuliert wird. Leider ist die Darstellung etwas unübersichtlich, was aber durch die ausführlichen Erklärungen wieder ausgewogen wird.

Eine schnörkellose, aber dennoch detaillierte Darstellung der DNA-Replikation birgt die Homepage der George-Mason-Universität in Fairfax, Virginia (**http://www.ncc.gmu.edu/dna/repanim.htm**). Die anschauliche Animation wird nach jedem entscheidenden Schritt unterbrochen, damit der Benutzer in Ruhe die dazugehörigen Erklärungen lesen kann.

Wer den Vorgang der Replikation lieber spielerisch erkunden möchte, findet auf **www.pbs.org/wgbh/aso/tryit/dna/#**, einer Seite des amerikanischen Medienunternehmens PBS, ein ganz besonderes Schmankerl: einen interaktiven DNA-Workshop. Per Mausklick trennt der Benutzer die beiden Stänge der Doppelhelix und kann dann Baustein für Baustein die neu entstehenden Tochterstränge »synthetisieren«. Nach jedem Schritt werden in einem kleinen Textfenster die soeben durchgespielten Mechanismen erklärt. Auf dieselbe Weise kann man die Übersetzung der verschlüsselten Botschaft in Proteine erkunden: anklicken und Schritt für Schritt das dargestellte DNA-Molekül in Proteinbausteine übersetzen.

Zur Vorgeschichte bietet **http://zope.reaktor.fh-furtwangen.de/portal/natural_sciences/nuclear_sciences/biostrahlen/biostrahlen1/slide01.html**, eine Infoseite der Fachhochschule Furtwangen, einen guten Überblick: von der Erkenntnis des antiken Philosophen Platon, dass Vater und Mutter gleichermaßen an der Übertragung von Merkmalen beteiligt sind, über den Mönch Gregor Mendel und seine Erbsen im Klostergarten von Brünn bis hin zu den Experimenten, mit denen Oswald T. Avery 1944 endgültig bewies, dass die DNA das Trägermolekül der Erbinformation ist. ◁



HTTP://BIOLOGY.KENYON.EDU/COURSES/BIO114/SLIDES/SLIDES-1.HTML

Das Original-Demonstrationsmodell der DNA von 1953

Unsichtbare Wälder im Meer

Der Kohlendioxidgehalt der Erdatmosphäre wird entscheidend vom Phytoplankton der Ozeane beeinflusst.

WEITERE THEMEN IM JUNI

Mathematische Figuren aus Südindien

Die traditionellen Kolam-Muster enthalten Strukturen, die das Interesse der modernen Informatik erregen.

Ultrakalte Atome

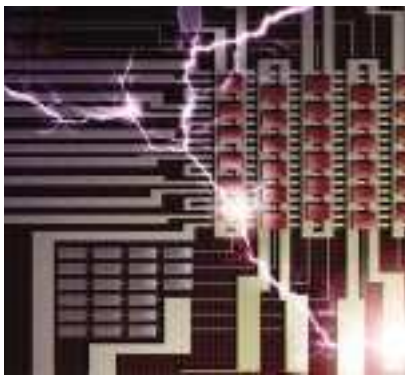
Mit raffinierten Tricks kühlen Physiker Gaswölkchen fast auf den absoluten Nullpunkt. Dabei zeigt die Materie anschaulich Quanteneigenschaften.

Die Hubble-Konstante und der expandierende Kosmos

Unzählige Beobachtungsstunden verwendeten Astronomen darauf, die Entfernung von Galaxien möglichst genau zu bestimmen, um daraus eine der wichtigsten Größen für die Beschreibung des Weltalls abzuleiten: die Hubble-Konstante.

Die Evolution unserer Hautfarben

Helle Haut hilft in nördlichen Breiten gegen Rachitis. Dunkle Haut bewahrt in südlichen Ländern – besonders in der frühen Schwangerschaft – vor Folsäuremangel. Die medizinische Balance gelingt vielen Menschengruppen heutzutage nur durch bewusstes Verhalten.



Mikrochips – Vorsicht Lawinengefahr

Je kleiner die Chips, desto bedrohlicher die Folgen elektrostatischer Entladung. Jede neue Generation von Schaltkreisen erfordert deshalb auch neue ausgetüftelte Schutzmaßnahmen.